

文章编号: 1001-1455(2009)05-0463-05

# 钢质套筒被动围压下混凝土材料的 冲击动态力学性能\*

李祥龙<sup>1</sup>, 刘殿书<sup>1</sup>, 冯明德<sup>2</sup>, 李胜林<sup>1</sup>, 颜治国<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力建与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 北京盛润洋投资咨询有限公司, 北京 100020)

**摘要:** 为了研究混凝土材料在钢质套筒侧限约束下的动态力学性能参数和破坏规律, 采用分离式大直径 ( $\varnothing 75$  mm) SHPB 实验技术, 测试了钢质套筒侧限约束下不同混凝土试件在不同载荷作用下轴向或径向的应力、应变峰值, 平均应变率, 计算了混凝土材料的损伤值, 描述了加载破坏现象, 对实验结果进行了分析。结果表明: 混凝土材料在被动围压下, 延性、抗破坏能力得到加强, 具有明显的增强效应。被动围压下 SHPB 实验中混凝土材料的破坏应变为典型 SHPB 实验中破坏应变的 1.8~2.8 倍; 破坏应力达到 150 MPa 以上, 为静力学无围压条件下的 2~5 倍。

**关键词:** 爆炸力学; 动态力学性能; 被动围压; 混凝土; 应变率

**中图分类号:** O383.2; TU501

**国标学科代码:** 130·3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

混凝土材料是一种应用极为广泛的工程材料<sup>[1]</sup>, 其结构形式从单一的房屋建筑结构扩展到海洋平台、高拱坝、核电站混凝土保护层等复杂结构, 工作环境和载荷作用形式也变得更加复杂<sup>[2]</sup>。特别是近年来, 对各种如桥墩、支撑等工程混凝土柱体结构, 为提高其强度及延性, 广泛地采用柱体四周侧向约束的结构形式<sup>[3]</sup>, 混凝土材料受力状态的不同, 表现出的力学性能存在较大的差异, 因此有必要对混凝土材料在不同受力状态下的力学性能进行研究<sup>[4-6]</sup>。本文中将通过分离式 Hopkinson 压杆 ( $\varnothing 75$  mm) 的冲击压缩实验对钢质套筒被动围压下混凝土的动态压缩力学性能进行研究。

## 2 被动围压 SHPB 实验原理及方案

被动围压下 SHPB 实验装置如图 1 所示, 混凝土试件的径向受到套筒的约束, 如图 2(a) 所示<sup>[7]</sup>。

试件直径为 75 mm, 长度为 75 mm。选用弹性模量为 210 GPa 的 45 钢, 制作成厚度为 3 mm、半径为 75 mm、长 110 mm 的套筒对混凝土材料试件侧面进行钢质套筒约束, 在冲击加载过程中, 柱体试件沿径向膨胀的变形受到套筒的限制, 这样就实现了试件的被动围压荷载。在套筒外表面粘贴半导体应变片, 应变片的长边与套筒的轴向垂直, 测出的信号即是试件的径向动态响应。

撞击杆长 800 mm, 打击杆入炮堂深度为 2 000 mm, 用不同气压 (0.8、1.2、1.6、2.0、2.4 MPa) 来控制冲击加载强度, 在每种加载强度下 (以气压作为参考) 对 C30、C40、C50、C60 混凝土试件分别进行 3 次冲击实验。主要测试出混凝土试件在不同冲击加载条件下的径向应力峰值、轴向应力峰值、轴向应变峰值、平均应变率等。

图 2(b) 给出了被动围压实验中试件纵向平面内某一单元体的受力状态。套筒、试件及压杆的拼装照片如图 3 所示, 实验中须确保混凝土试件处于套筒的中心处。

\* 收稿日期: 2008-04-16; 修回日期: 2008-11-08

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目 (20060290013)

作者简介: 李祥龙 (1981—), 男, 博士。

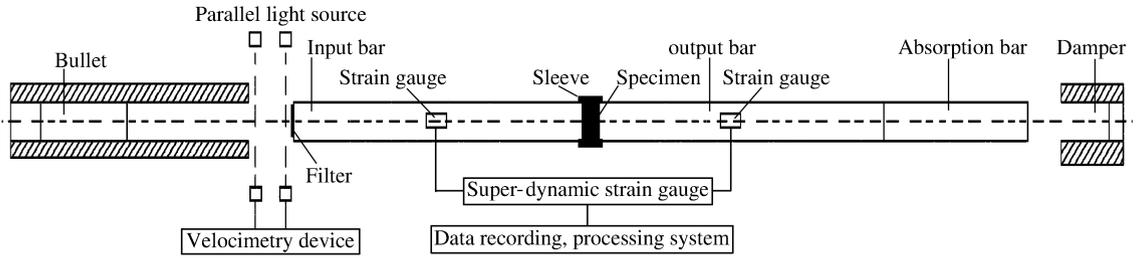


图 1 被动围压 SHPB 实验装置示意图

Fig. 1 A sketch map for the passive confining pressure SHPB system

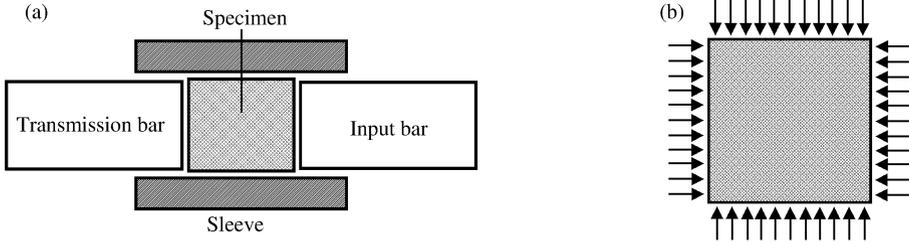


图 2 被动围压实验中试件受到的约束及其受力状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the specimen subjected to passive confining pressure



图 3 套筒、试件、压杆组装照片

Fig. 3 Photos for the installation of sleeve, specimen and pressure bar

### 3 钢质套筒被动围压实验结果及分析

混凝土材料是一种多组分的复合体,文中对混凝土材料静态力学性能参数进行相关的测定,并与动力学性能参数进行对比研究。参照《普通混凝土力学性能实验方法标准》,同时参考《水利水电工程岩石实验规程(SL264-2001)》对不同使用的混凝土材料进行静态力学性能的测试。

表 1 混凝土材料静力学参数测试结果

Table 1 Test results of static mechanics parameters for concrete materials

标号	编号	$v_p/(m/s)$	$\sigma_c/MPa$	$E/GPa$	$E_d/GPa$	$\mu$
C30	C30A	4 331	46.37	20.71	43.61	0.238
	C30B	4 700	67.06	25.53	53.19	0.138
	平均值	4 516	56.70	23.12	48.40	0.188
C40	C40A	4 366	55.38	23.68	44.19	0.221
	C40B	4 755	65.89	27.49	53.45	0.192
	平均值	4 589	69.10	27.97	49.66	0.200
C50	C50A	4 446	66.52	27.95	45.88	0.256
	C50B	4 731	71.68	27.98	53.44	0.144
	平均值	4 589	69.10	27.97	49.66	0.200
C60	C60A	4 494	80.53	34.89	49.03	0.163
	C60B	4 813	86.26	34.46	56.36	0.171
	平均值	4 654	83.40	34.68	52.70	0.167

混凝土材料动弹性模量由声波测试实验获得,测试仪器设备采用 NM-3C 非金属超声波分析检测仪,声波通过时间的读数精度为  $0.01 \times 10^{-6}$ 。计算公式如下

$$v_p = H/t_p, \quad E_d = 10^{-6} v_p^2 \rho$$

式中: $v_p$  为纵波的速度, $t_p$  为纵波通过试件的时间, $H$  为试件的高度, $E_d$  为动弹性模量, $\rho$  为试件的密度。结果见表 1,其中  $\sigma_c$  为单轴抗压强度, $E$  为弹性模量, $\mu$  为泊松比,A、B 表示从 C30~C60 混凝土试件随机抽取的 2 个试件代号。

从混凝土材料静力学实验结果来看,随着配比强度的提高,相应的纵波波速、单轴抗压强度、弹性模量、动弹性模量等力学参数均表现出增加的趋势。

### 3.1 实验结果

损伤变量  $D$  的定义,以及如何具体解释损伤变量  $D$  和进行  $D$  的测量,是损伤力学中最具争议的问题之一,本文中利用下式计算出混凝土材料受到冲击载荷作用后的超声波波速的变化来反映混凝土材料的损伤,  $D = 1 - (v_{0s}/v_s)^2$ ,  $v_{0s}$ ,  $v_s$  分别为材料损伤前、后的超声波波速;当  $D=0$  时,表明测点部位的材料没有损伤;当  $D=1$  时,表明测点部位材料已经被破坏并失去了承载能力。

因篇幅所限,仅绘制出 C30、C40 混凝土材料在炮堂气压为 1.6 MPa 时的实验结果,如图 4 所示。

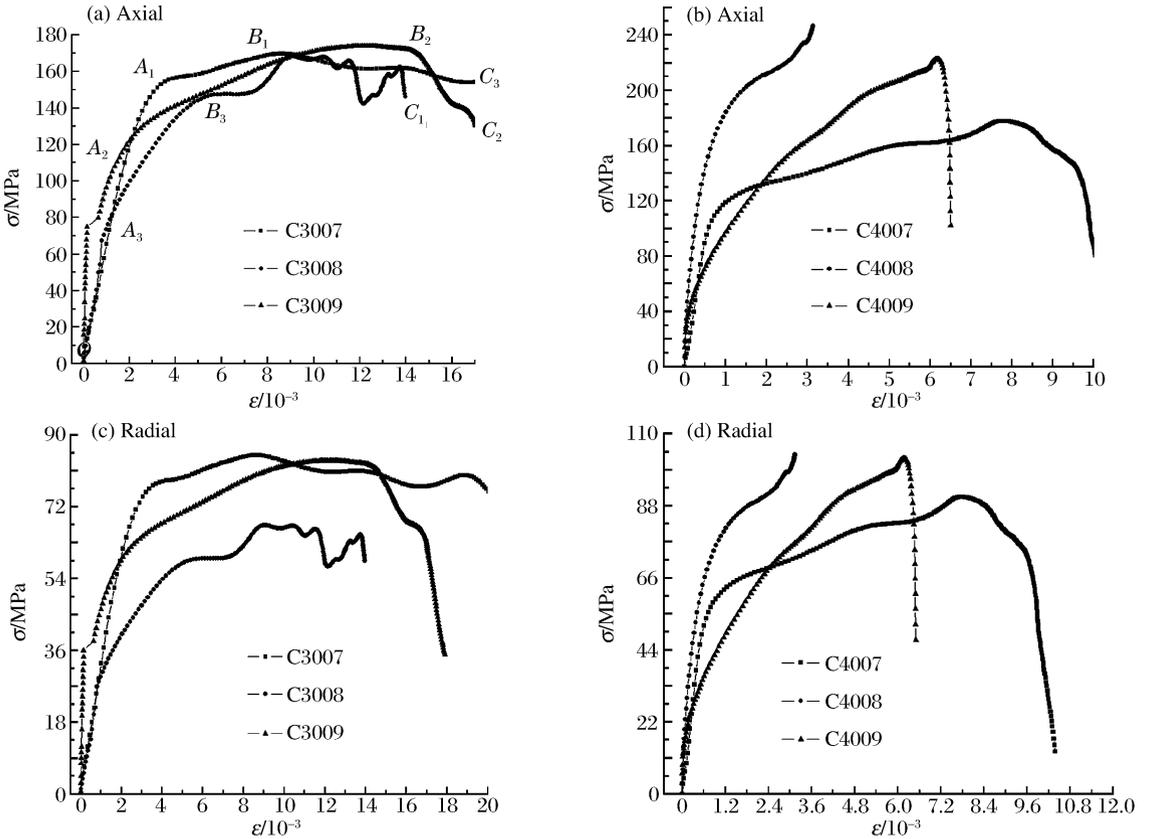


图 4 C30、C40 混凝土材料在炮堂气压为 1.6 MPa 时的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of the C30, C40 concrete materials at the gun pressure of 1.6 MPa

### 3.2 实验结果分析

以图 4(a) 为例,依据曲线的变化趋势,分别在曲线上划分出了 OA 段、AB 段、BC 段。通过对各段的分析,发现轴向应力应变曲线具有如下特点。

(1) 曲线的开始阶段(OA 段),基本为直线。随着轴向应变的增大,轴向应力增加的速度较快,由此弹性阶段获得的混凝土轴向动态弹性模量较大,为 50~150 GPa,相当于静力学实验中相应的平均动弹性模量的 2~5 倍;这和以往文献中给出的具有增强效应是一致的,只是增强的幅度不同而已,这与侧限约束作用有关。

(2)当应力超过  $B$  点后,应力应变曲线进入了  $AB$  段。此段的应力应变曲线相对  $OA$  段变得较缓,此时随着应变的增加,应力增加的幅度逐渐减弱,混凝土材料进入了弹塑性阶段。依据经典弹塑性力学的观点,混凝土材料产生了不可恢复的变形——塑性变形。当应变对应点超过  $B$  点后,在  $BC$  段内曲线平缓下降,此段混凝土材料经历了塑性变形到材料破坏的过程,开始下降点为混凝土材料的破坏点,此时的应力应变为混凝土材料在被动围压下破坏的应力应变。

(3)一般认为混凝土材料的破坏应变为  $5 \times 10^{-3}$ <sup>[8]</sup>,在被动围压实验中混凝土材料的破坏应变为  $(9 \sim 14) \times 10^{-3}$ ,是典型 SHPB 实验中混凝土材料破坏应变的 1.8~2.8 倍。表明在套筒约束下混凝土材料的延性增强了,抗破坏能力得到加强。同时也说明在侧限约束条件下,混凝土材料的破坏形态和破坏机理可能与无约束条件下存在较大的差别。

(4)动态破坏应力与静态载荷相比,存在较大的差别。静力学实验单轴抗压强度为 50~84 MPa,而在被动围压条件下,混凝土材料发生破坏的轴向应力均达到 150 MPa 以上,为相应的平均静力学无围压条件下的 2~5 倍。说明,混凝土材料在被动围压下,具有明显的增强效应。

(5)图 5 给出了 C30、C40 混凝土材料在不同应变率条件下的轴向应力应变曲线。由图可知,随着应变率的增加混凝土材料的初始弹性模量、破坏应力、破坏应变等相应地提高。

从能量的角度来看,混凝土材料的破坏是由于裂纹的产生和发展而导致的,依据断裂力学<sup>[9-10]</sup>的观点,裂纹形成过程中所需要的能量远比裂纹在发展过程中所需要的能量高,加载速度越高产生的裂纹数目越多,因而耗散的能量越多。高应变率下,荷载作用时间很短,混凝土材料没有足够的时间用于能量的积累,所以只有通过增加应力的方法来提供能量达到目的,使混凝土材料的刚度、强度随应变率的增加而增加。

从损伤力学的角度来看,高应变率下混凝土材料出现了 2 种效应:应变率强化效应和损伤软化效应。在惯性效应的作用下,微裂纹需要时间来相互贯穿,损伤软化效应会出现滞后现象,而此时的应变率强化效应却在提高。高应变率下,混凝土材料的损伤软化效应滞后延缓了混凝土的损伤软化效应,从而延缓了混凝土的破坏,相应地提高了混凝土材料的刚度和强度。

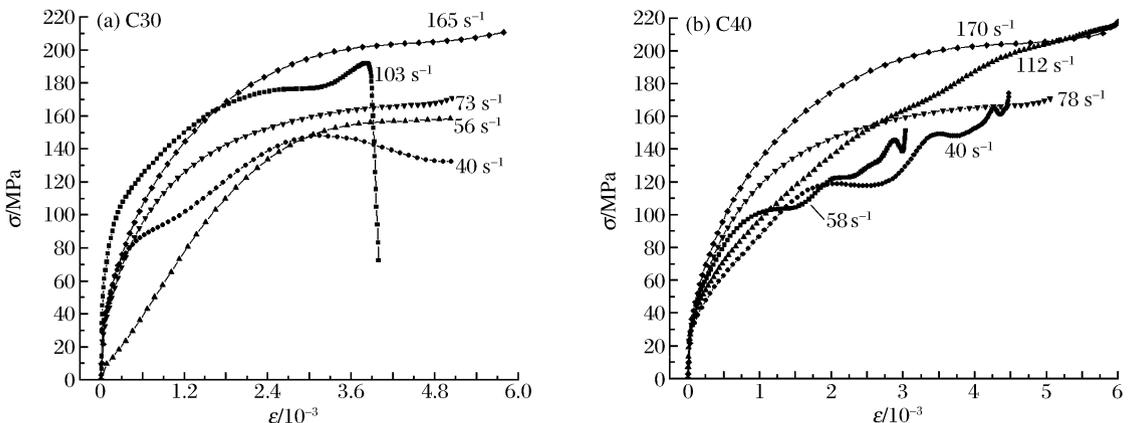


图 5 C30、C40 混凝土材料在不同应变率下的的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of the C30, C40 concrete materials at different strain rates

## 4 结 论

(1)动态冲击加载过程中,混凝土的动弹性模量较大,各向异性程度明显增大。(2)在被动围压下,混凝土材料的延性、抗破坏能力得到加强,具有明显的增强效应。具体表现为被动围压下中混凝土材料的破坏应变为  $(9 \sim 14) \times 10^{-3}$ ,为典型 SHPB 实验中破坏应变的 1.8~2.8 倍;破坏应力达 150 MPa 以上,为相应的平均静力学无围压条件下的 2~5 倍。(3)混凝土材料具有应变率效应:随着应变率的增加混凝土材料的初始弹性模量、破坏应力、破坏应变等相应的提高。在低应变率下,增加的幅度较大,在高应变率下,增加的幅度相对变小了,有时则会出现应变率效应减弱的现象。

## 参考文献:

- [1] Mehta P K. 混凝土的结构、性能与材料[M]. 祝水年, 译. 上海: 同济大学出版社, 1991.
- [2] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] Harmon T G, Ramakrishnan S, Wang E H. Confined concrete subjected to uniaxial monotonic loading[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 23(4): 67-71.
- [4] Oriz M. A constitutive theory for the in elastic behavior of concrete[J]. *Mechanical of Material*, 1985, 4(1): 67-93.
- [5] 杜修力. 高拱坝抗震研究[C]//袁驷, 张跃, 茹继平. 结构工程研究新进展. 北京: 科学出版社, 1997: 152-158.
- [6] 王礼立. 爆炸与冲击载荷下结构和材料动态响应研究的新进展[J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(2): 81-88.  
WANG Li-li. Progress in studies on dynamic response of structures and materials under explosive/impact loading [J]. 2001, 21(2): 81-88.
- [7] 施绍裘, 王礼立. 材料在准一维应变下被动围压的 SHPB 试验方法[J]. *实验力学*, 2000, 15(4): 377-384.  
SHI Shao-qiu, WANG Li-li. Passive confined pressure SHPB test method for materials under quasi-one dimensional strain state[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(4): 377-384.
- [8] 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.
- [9] 赵建生. 断裂力学及断裂物理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996: 48-55.
- [10] 丁遂栋. 断裂力学[M]. 北京: 机械出版社, 2002: 91-96.

## Dynamic mechanical properties of concrete materials subjected to passive confining pressure produced by a steel sleeve

LI Xiang-long<sup>1\*</sup>, LIU Dian-shu<sup>1</sup>, FENG Ming-de<sup>2</sup>, LI Sheng-lin<sup>1</sup>, YAN Zhi-guo<sup>1</sup>

(1. *School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083;*

2. *Beijing Shengrunfeng Investment Advisory Co., Ltd., Beijing 100020*)

**Abstract:** The 75-mm-diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique was applied to experimentally obtain axial or radial stress and strain peaks, average strain rates of different concrete specimens laterally confined by steel sleeves under different impact loads. The damage values of concrete materials were calculated, the damage situations of concrete materials under impact load were described, and the experimental results were analyzed. It is indicated that ductibility and damage resistance of concrete materials increase under passive confining pressure. The failure strains of concrete materials under passive confining pressure is 1.8~2.8 times as large as that in the conventional SHPB experiments. Failure stress is above 150 MPa, which is 2~5 times as large as the static failure stress without passive confining pressure. The result is helpful for the investigation on security protection and failure law of concrete under the lateral confining conditions.

**Key words:** mechanics of explosion; dynamic mechanical properties; passive confining pressure; concrete; strain rate

\* Corresponding author: LI Xiang-long

E-mail address: lx00014002@yahoo.com.cn

(责任编辑 张凌云)