DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0180-06

基于三维 Hopkinson 杆的混凝土动态力学性能研究*

徐松林[1],王鹏飞[1],赵 坚[2],胡时胜[1]

(1.中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽 合肥 230027;
2.莫纳什大学土木工程系,澳大利亚 墨尔本 维多利亚 3180)

摘要: 混凝土、岩石类材料在复杂应力状态下的动态力学性能研究一直备受关注,但鉴于动态实验的复杂性,对真三轴应力状态下材料的动态加载一直未曾实现。本文中研制了一套真三轴静载作用下混凝土、岩石类材料的"三维 Hopkinson 杆"动态力学实验系统,为冲击载荷作用下材料动态各向异性特性的研究提供了一种有效的实验测试技术。该系统采用液压伺服控制对立方体试件施加三向独立的 0~100 MPa 真三轴静载,再利用分离式 Hopkinson 压杆对试件施加冲击动载,具体研究了 C30 混凝土材料在不同真三轴静载条件下的动态压缩性能,得到了不同条件下 X、Y、Z 方向上的动态应力应变关系。

关键词: 动态力学性能;真三轴静态加载;混凝土;三维 Hopkinson 压杆

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

混凝土、岩石类材料一般处在复杂的三向应力状态下(σ_x,σ_y,σ_z),其力学性质呈现非连续、非均匀和各向异性等特点,在复杂应力状态下的力学性能一直是学者们关心的问题。随着地下工程、水利工程往深度与广度发展,尤其是深部岩土工程、大陆深钻井等超大型科学项目的推进,研究复杂应力状态下的混凝土、岩石类材料的动态强度和变形特性,对于地震机制以及工程应用等领域的研究都具有重要意义[1]。目前,关于单轴动态加载下混凝土类材料力学性能的研究比较多[2],对复杂应力状态下混凝土、岩石类材料在冲击载荷作用下的强度与变形特性的研究主要是在 Hopkinson 压杆[3-4]的基础上采用主动围压装置,其初始的静载为侧向等围压状态,即 $\sigma_y=\sigma_z$。李海波等[5]采用一种岩石高压动三轴实验系统分别对不同地区的花岗岩开展了围压在 20~170 MPa、应变率在 10^{-4}~10^{0} s^{-1} 范围的三轴压缩实验。李夕兵等[6]在已有的霍普金森压杆主动围压装置上增加了轴向加载油缸,分别对试件进行围压和轴压的预加载,但其初始的静载仍为侧向等围压状态。张磊等[7]进一步通过在液压系统中串联接入大容量均衡油缸同步对试件施加围压和轴压,实现了三向围压。然而三向压力相等与实际情况不符,而且其压力幅值受到限制。而我们需要得到能反映工程实际中的真实三轴应力($\sigma_x\neq\sigma_y\neq\sigma_z$)状态。目前,动态载荷作用下的真三轴加载技术尚处于初级阶段,E. Cadoni 等[8-9]提出了真三轴静载与 SHPB(split Hopkinson pressure bar)装置结合的实验设想,即试件初始由静载加载到真三轴应力状态,而后在某一个方向施加冲击载荷。这种设想可用来模拟真三轴应力状态下岩石所处的真实地应力水平,这与深埋岩石所受的地震等动态载荷主要来自于某一个方向相类似。Zhang Q B 等[10]和 Zhao J 等[11]多次介绍了此实验思想在深埋岩石工程中的重要作用,但目前尚没有进行混凝土、岩石类材料真三轴静载应力状态下冲击特性实验的设备。

因此,发展一种可以对试件施加真三轴静载应力状态,并能监测到冲击加载过程中试件 6 个面上动态应力状态的实验装置,对于准确揭示混凝土、岩石类材料在不同应力路径下的动态变形及破坏强度和

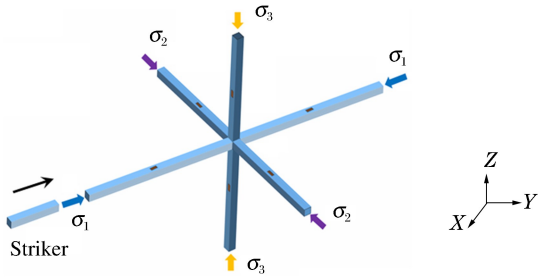
* **收稿日期:** 2017-01-06; **修回日期:** 2017-01-19
基金项目: Australian Research Council Project(LE150100058);
国家自然科学基金项目(11272304,11472264,11672286)
第一作者: 徐松林(1971—),男,博士,副教授,slxu99@ustc.edu.cn。

机制有重要意义。本文中，在此基础上研制一种可用于研究不同初始应力状态下材料的动态变形及破坏响应的“三维 Hopkinson 杆”实验系统，并对 C30 混凝土材料进行深入探讨。

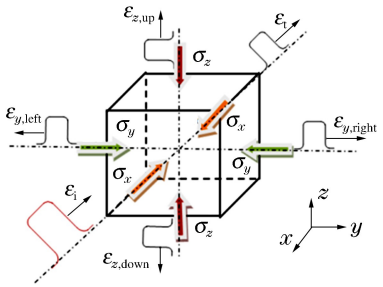
1　真三轴静载下混凝土类材料的“三维 Hopkinson 压杆”实验系统[12]

如图 1(a)～(b)所示，试件采用 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体，放在 6 根方杆中间。整个动态实验系统的装配和实物如图 1(c)～(d)所示。在冲击加载之前，试件的 3 个主方向采用液压伺服控制系统同时施加各自所需要的应力，并保持稳定的真三轴静载状态。冲击过程中立方体试件 6 个面的动态响应与损伤演化可以通过 3 个维度上 6 根方杆上的应变片信号来分析。

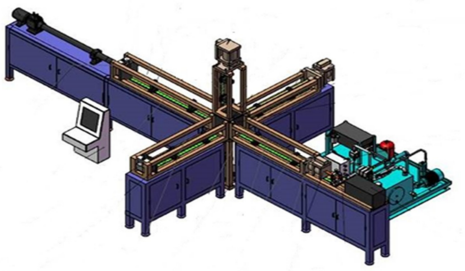
(a) Schematic diagram of dynamic test under static triaxial loads



(b) Stress state diagram of cubic specimen



(c) System assembly drawing



(d) Experimental apparatus.



图 1　三维 Hopkinson 杆动态实验设备

Fig. 1　3D-Hopkinson bar dynamic testing system

此实验系统中 6 根方杆的截面为 50 mm×50 mm，X 方向入射杆长度为 2 500 mm，透射杆长度为 2 000 mm；Y 方向的 2 根杆的长度均为 2 000 mm；Z 方向的 2 根杆的长度均为 1500 mm。实验装置 3 个方向的方杆长度远大于试件的尺寸，因而能很好地满足 SHPB 的一维假定和试件均匀假定。气炮的子弹长度不超过 500 mm，可确保能在 6 根杆上记录到完整的应力波形。X、Y、Z 3 个方向采用液压伺服控制系统施加的最大静载均可达到 100 MPa，X 方向上子弹的最大冲击速度为 50 m/s，其另一端则安装有能量吸收装置。

不同应力状态下三维 Hopkinson 杆的基本原理与传统的一维分离式 Hopkinson 压杆实验技术是完全相同的，都要遵循“杆中一维应力波”假定和“试件应力/应变均匀化”假定。试件上作用的实际载荷 σ 为各方向的静载荷 σ_s 和动载荷 σ_d。其中，静载荷 σ_s 按实际施加的载荷计算；动载荷 σ_d 可根据各方向的冲击实验波形分别处理，并应用传统的分离式 Hopkinson 压杆的数据处理公式得到试件在真三轴静载荷 σ_s 作用下，X、Y、Z 方向随时间变化的应变率 $\dot{\varepsilon}_{x,d}$、应变 $\varepsilon_{x,d}$ 和应力 $\sigma_{x,d}$。“三维 Hopkinson 杆”不仅仅是一种真三轴静载作用下材料的分离式 Hopkinson 压杆动态力学性能测试系统，而且利用 Y、Z 轴方向的方杆可以记录到材料在 X 轴冲击载荷作用时，侧向 2 个维度的动态响应状态。在 Y 或 Z 方向，利用 2 根杆上的应变片信号可以直接得到试件两端的质点速度和应力状态，利用下式：

$$\dot{\varepsilon}_k(t)=\frac{|\Delta V|}{L_k}=\frac{C_0\left|\varepsilon_{k,\mathrm{left}}(t)+\varepsilon_{k,\mathrm{right}}(t)\right|}{L_k} \tag{1}$$

可以计算出试件在垂直于冲击的两个方向的应变率，通过如下公式：

$$\varepsilon_k(t)=-\frac{C_0}{L_k}\int_0^t|\varepsilon_{k,\mathrm{left}}(t)+\varepsilon_{k,\mathrm{right}}(t)|\,\mathrm{d}t,\qquad \sigma_k(t)=\frac{A_0}{2A_k}E_0|\varepsilon_{k,\mathrm{left}}(t)+\varepsilon_{k,\mathrm{right}}(t)| \tag{2}$$

可以得到试件在这两个方向的应力和应变。试件在垂直于 X 冲击方向的 Y 方向和 Z 方向上的应变和应力的数据处理公式相同。式中：A_0 为方杆的截面积，A_k 和 L_k 分别为 k 方向（k 为 Y 或 Z）试件的初始截面积和长度；$\varepsilon_{k,\mathrm{left}}$、$\varepsilon_{k,\mathrm{right}}$ 分别为：k 为 Y 方向时，Y 方向左、右方杆上的信号；或 k 为 Z 方向时，Z 方向上、下方杆上的信号，实验要求试件的截面积与杆的截面积相等。在“三维 Hopkinson 杆”系统的单向冲击加载下，由于材料的泊松效应导致试件在侧向也具有一定的变形速率，利用此套实验系统可以有效地分析材料在 3 个维度方向的变形特性和动态泊松效应。

2 混凝土材料 C30 的“三维 Hopkinson 压杆”实验

2.1 实验方案

实验中采用的 C30 混凝土，主要由水、水泥、标准砂、粗骨料以一定配合比制得。实验过程主要由三轴静载应力（$\sigma_x\neq\sigma_y\neq\sigma_z$）的施加和 X 方向冲击加载 2 个阶段组成。首先采用液压伺服控制对 C30 混凝土试件同步施加无静载、双轴静载，以及三轴静载等 3 种应力状态的静载值，再利用气炮驱动子弹，在 X 方向进行真三轴静载下的分离式 Hopkinson 压杆实验。通过 6 根杆上的应变片，适时记录冲击过程中的应变波形。

2.2 实验波形分析

真三轴静载下的动态实验实测到的原始波形如图 2 所示。X 冲击方向的 3 个波满足常规的 SHPB 实验的基本假定；Y 方向的 2 个波和 Z 方向的 2 个波均具有较好的一致性。

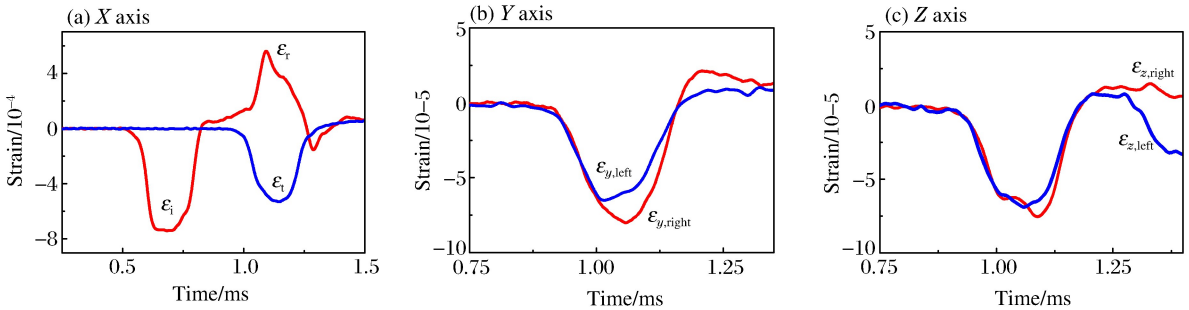


图 2 在静载[15 MPa，6 MPa，10 MPa]、冲击速度 13.2m/s 下 6 根杆上的典型信号

Fig. 2 Recorded wave profiles in six bars under [15 MPa, 6 MPa, 10 MPa] triaxial static load and impact velocity 13.2 m/s

如图 3 所示，入射波形卸载后的基线并非为零，而是实验第 1 阶段施加的静载（30、45、60 MPa）。在实验的第 2 阶段之初，即冲击加载过程，X 杆上的载荷又叠加上与打击杆速度成正比的冲击载荷，与此同时，方杆的端部与反力支架已经脱开；之后的冲击卸载过程，其起始点为 D，由于方杆端部已不受反力支架约束，其终止点应该是 A，而不是 E。之后则由于反力支架的弹簧作用，最初施加的静载又开始作用，这主要表现在图 3 中从点 A 到点 B 到点 C，逐渐向基线靠拢。

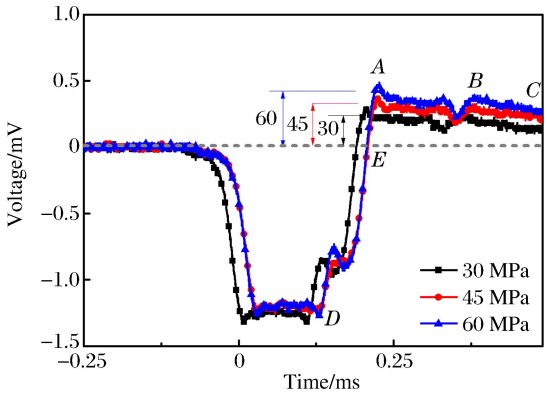


图 3 不同静载、冲击速度 19 m/s 下 X 轴的入射波波形

Fig. 3 Incident waveform of X-axis under different static loads and impact velocity 19 m/s

2.3　应力应变关系

图 4 为试件在 X、Z 轴加静载(30 MPa)，Y 轴不加静载，且 Y 轴 2 根方杆不与试件接触下的动态应力应变关系。如图 4(a) 所示，分离式 Hopkinson 杆动态加载的 X 轴应力随冲击速度的增大而增大，试件尚未破坏。当冲击速度达到 14.23 m/s 时，试件破坏失效。Z 轴上受到试件泊松比的影响，也会产生一些信号，此应力值随着冲击速度的增大而不断提高。

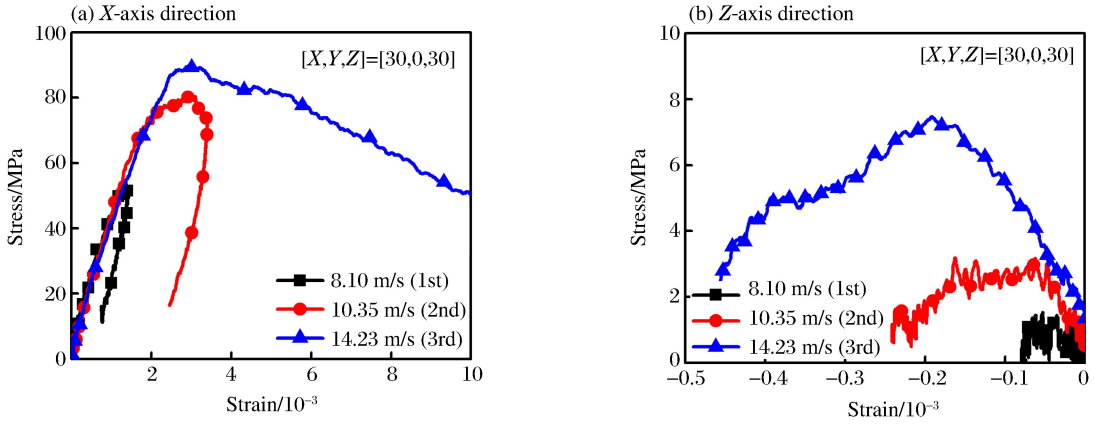


图 4　试件在 X、Z 双轴静载[30 MPa，0，30 MPa]下的动态应力应变曲线

Fig. 4　Dynamical stress-strain curves of the specimen under X, Z biaxial static load [30 MPa, 0, 30 MPa]

如图 5(a)所示，试件在传统的一维 Hopkinson 杆加载下(无三轴静载)，较低冲击速度(13.0 m/s)即可使试件破坏失稳。随着静载的应力状态由无静载到三轴静载(60 MPa)，X 方向动态应力应变关系由线性段，而后发展到有较长的“塑性变形”阶段。这也表明：真三轴静载状态下材料的屈服阶段变得较复杂，这需要进一步描述。三轴静载下的样品在单轴施加冲击载荷，由于动态泊松效应，必然引起试件在 Y、Z 方向的变形。实验得到 Y、Z 方向的应力应变关系具有很好的重复性，如图 5(b)所示，这是由于 Y 和 Z 轴的静载力相等。当 Y 和 Z 轴的静载力不相等时，其对应的应力应变关系也会不一致。与传统的基于 Hopkinson 杆的主动围压实验不同的是此“三维 Hopkinson 杆”实验系统可以提供不同的静载条件，得到试件在 3 个方向上的动态应力应变关系，可以测试材料在动态加载下的各向异性特性。

在无静载、双轴静载以及三轴静载等 3 种应力状态下，C30 混凝土试样单轴冲击破坏的形貌如图 6 所示。当无静载作用时，试件周围处于自由状态，冲击加载下混凝土发生较严重的碎裂，如图6(a)所示。

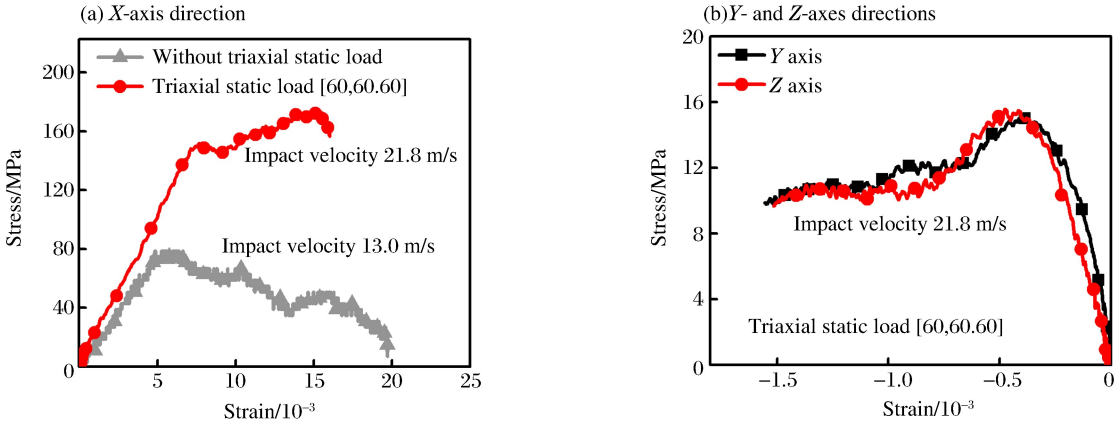


图 5　试件在三轴静载[60 MPa，60 MPa，60 MPa]、单轴冲击(21.8 m/s)下的动态应力应变曲线

Fig. 5　Dynamical stress-strain curves of the specimen under triaxial static load [60 MPa, 60 MPa, 60 MPa] at the impact velocity of 21.8 m/s

当在 X 和 Y 方向对试件施加双向静载时，试件 Z 方向的 2 个面处于自由状态，当在 X 方向冲击加载试件时，试件的破坏呈现明显的层状剥离的现象，碎块剥离的层面与 Z 轴垂直，如图 6(b)所示。这种层状剥离破坏面的存在揭示出试件破坏模式对应力状态的依赖性，即破裂面一般垂直于最小主应力的方向，这与高地应力区域岩芯饼状碎裂的机制相同，可为岩爆的模拟[13-14]提供一种新的物理模拟方法。当在试件的 3 个方向都施加一定的真三轴静载时，试件在受单向冲击力的作用下一般不会产生明显的破坏，如图 6(c)所示。由于试样各个面都受到限制，其失效发生在材料的内部，如图 6(c)中的白色条带。一般情况下，试件在三轴静载状态($\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z$)下很难冲击破坏，可以通过改变冲击前的三轴应力状态，例如减小其中某一个方向上的应力以增加剪切应力，然后再进行冲击，可使试件产生明显的破坏特征。



图 6 不同实验条件下混凝土试样破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of concrete specimens under different lateral confinement conditions

3 结 论

本文介绍了一种“三维 Hopkinson 杆”实验系统，通过此系统可以研究混凝土、岩石类材料在不同真三轴静载条件下的动态压缩性能。实验分析了不同静载条件下 C30 混凝土 3 个方向上的动态应力应变关系。此实验系统为研究动态载荷作用下材料的各向异性特性提供了一种有效的实验技术。

参加本文实验工作的还有研究生施春英、单俊芳、张鸣、周李姜；调试过程得到了洛阳利维科技公司的大力协助，在此谨表谢意！

参考文献：

[1] 席道瑛，徐松林. 岩石物理与本构理论[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2016：60-101.

[2] 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 Shisheng, Wang Daorong, Liu Jianfei. Responses of continuously reinforced concrete pavement under transient load[J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(5): 115-118.

[3] 胡时胜，王礼立，宋力，等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾[J]. 爆炸与冲击，2014，34(6)：641-657.
Hu Shisheng, Wang Lili, Song Li, et al. Review of the development of Hopkinson bar technique in China[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(6): 641-657.

[4] 王礼立，胡时胜，杨黎明，等. 材料动力学[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2016：179-209.

[5] 李海波，赵坚，李俊如，等. 三轴情况下花岗岩动态力学特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击 2004，24(5)：470-474.
Li Haibo, Zhao Jian, Li Junru, et al. Triaxial compression tests of a granite[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 470-474.

[6] 李夕兵；周子龙；邓义芳，等. 动静组合加载岩石力学实验方法与装置：中国，CN200510032031. 6[P]. 2006-02-08.

[7] 张磊，徐可立，刘瑞朝，等. 一种霍普金森压杆主动围压实验的围压缸装置：中国，CN202837089U[P]. 2013-03-27.

[8] Cadoni E, Albertini C. Modified Hopkinson bar technologies applied to the high strain rate rock tests[C]// Zhou Y

X，Zhao J. Advances in Rock Dynamics and Application. Hoboken：CRC Press，2011：79-104.

[9] Cadoni E. Mechanical characterization of rock materials at high strain-rate[C]// Li Jianchun，Zhao Jian. Rock Dynamics and Applications：States of Art. Hoboken：CRC Press，2013：137-148.

[10] Zhang Q B，Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behavior of rock material[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2014，47(4)：1411-1478.

[11] Zhao J，Wu W，Zhang Q，et al. Some recent developments on rock dynamic experiments and modeling[C]// Li Jianchun，Zhao Jian. Rock Dynamics and Applications：States of Art. Hoboken：CRC Press，2013：25-40.

[12] 徐松林，赵坚，宋晓勇，等. 一种基于真三轴静载的岩石霍普金森冲击加载装置：中国，CN：201620574575. 9[P]. 2016-06-15.

[13] 徐松林，吴文，张华. 大理岩三轴压缩动态卸围压与岩爆模拟分析[J]. 辽宁工程技术大学学报，2002，21(5)：612-615.
Xu Songlin，Wu Wen，Zhang Hua. Experimental study on dynamic unloading of the confining pressures for a marble under triaxial compression and simulation analyses of rock burst[J]. Journal of Liaoning Technical University，2002，21(5)：612-615.

[14] 徐松林，吴文，王广印，等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究Ⅱ：剪切断裂能分析[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(1)：65-69.
Xu Songlin，Wu Wen，Wang Guangyin，et al，Study on complete procedures of a marble under triaxial compression Ⅱ：Analysis of shear fracture energy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21(1)：65-69.

Dynamic behavior of concrete under static triaxial loading using 3D-Hopkinson bar

Xu Songlin[1]，Wang Pengfei[1]，Zhao Jian[2]，Hu Shisheng[1]

(1. *CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials*，*University of Science and Technology of China*，*Hefei* 230027，*Anhui*，*China*；
2. *Department of Civil Engineering*，*Monash University*，*Victoria* 3180，*Melbourne*，*Austrilia*)

Abstract：A type of 3D-Hopkinson bar dynamic testing system for investigating the dynamic behavior of concrete and rock under static triaxial loading was developed. The hydraulic servo control system employed in the testing system could provide independent triaxial pressure up to 100 MPa，and the split Hopkinson pressure bar employed in the impacting direction could provide dynamic loads. The dynamic responses on six faces of the cube specimen can be recorded by six bars in three dimensions，the lateral deformation states of the specimen under dynamic loading were obtained and analyzed by using this novelty Hopkinson bar. The dynamic compressive behaviors of C30 concrete under different static triaxial loading were investigated.

Keywords：dynamic behavior；static triaxial loading；concrete；3D-Hopkinson pressure bar

（责任编辑　张凌云）