

文章编号: 1001-1455(2011)06-0619-05

# 侧限压缩下干燥砂的动态力学性能\*

郑 文, 徐松林, 胡时胜

(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 design 重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 通过添加波形整形器的分离式霍普金森压杆(SHPB), 研究了侧限条件下干燥砂在不同应变率和不同预压时的动态压缩力学性能, 并利用 MTS810 材料实验系统, 研究了干燥砂的准静态压缩应力应变曲线。实验采用的材料为硅基细颗粒干燥砂, 粒径分布范围为 150~245  $\mu\text{m}$ , 自然堆积状态的密度为 1.40  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。研究发现, 应变率对干燥砂压缩过程影响不大, 而不同的预压对实验结果影响显著。

**关键词:** 固体力学; 动态力学性能; SHPB; 干燥砂; 应变率效应; 预压

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

干燥砂作为一种典型的松散材料, 物理力学性质非常复杂, 既可从微观角度研究其颗粒之间的相互作用, 也可理想化为连续体研究其宏观力学性能。研究砂子等松散材料在高应变率下的响应特性对于采矿工程、地震研究和地下爆炸等都非常重要, 有关这类介质力学行为的研究一直是学术界的热点。

砂子的准静态力学性质可以通过液压装置实验得到, 但是因为实验技术等问题, 对砂子等松散材料在高应变率下的力学响应研究一直较少。C. W. Felice 等<sup>[1]</sup>研究了土的动态力学性能后认为, 当应变小于特定值时, 实验所得的应力应变关系应变率不敏感。皮爱如等<sup>[2]</sup>和李小雷等<sup>[3]</sup>研究了土壤的冲击力学性能, 认为土壤等松散材料有明显的应变率效应。而 A. M. Bragov 等<sup>[4]</sup>分别利用 SHPB 装置和一级轻气炮研究了石英砂的动态压缩性能, 认为砂子没有应变率效应。B. Song 等<sup>[5]</sup>利用 SHPB 装置研究了不同侧限材料下砂子的冲击压缩响应, 同样认为砂子的压缩过程没有应变率效应。

本文中, 通过钢套筒提供侧限约束使干燥砂试样成型, 利用添加了整形器的 SHPB 装置分别研究不同预压情况下干燥砂在不同应变率下的动态压缩性能, 同时利用 MTS810 材料实验系统得到干燥砂的准静态侧限压缩应力应变曲线。

## 1 实验方案

### 1.1 SHPB 动态实验技术

动态实验主要在中国科学技术大学冲击动力学实验室的 SHPB 装置上进行。图 1 为 SHPB 实验

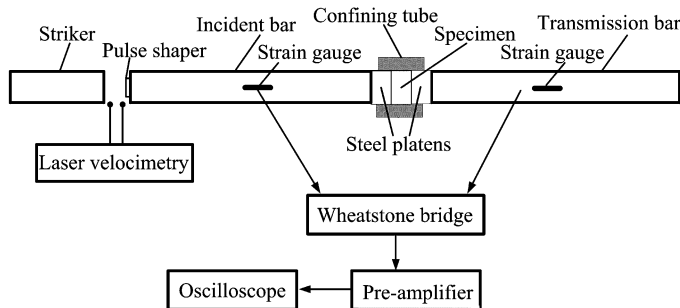


图 1 SHPB 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of split Hopkinson press bar setup

\* 收稿日期: 2010-08-20; 修回日期: 2011-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40874093); 中央高校基本科研业务费专项基金项目

作者简介: 郑 文(1985—), 男, 博士研究生。

装置示意图,主要包括:子弹以及由弹膛等组成的动力系统,由入射杆、透射杆等组成的载荷传递系统,激光测速装置和应变信号采集系统。入射杆和透射杆之间为试样。

该装置通过贴在入射杆和透射杆中部的应变片采集入射波  $\epsilon_i$ 、反射波  $\epsilon_r$  和透射波  $\epsilon_t$ 。根据一维应力波理论,可由下式计算出试样的动态平均应力、应变和应变率

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{A_0}{2A_s} E_0 [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \\ \epsilon(t) = \frac{c_0}{L_s} \int_0^t [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] dt \\ \dot{\epsilon}(t) = \frac{c_0}{L_s} [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_i(t)$ 、 $\epsilon_r(t)$  和  $\epsilon_t(t)$  分别为入射、反射和透射应变历史,  $A_0$  为杆的截面积,  $E_0$  和  $c_0$  分别为杆的杨氏模量和弹性波传播速度,  $A_s$  和  $L_s$  为试样的初始截面积和长度。

上述方程是建立在 2 个假设之上的:(1)压杆内传播的应力波是一维弹性波;(2)加载过程试样处于应力和应变均匀状态。干燥砂作为一种高孔隙松散材料,波速很低。在波速非常低的情况下,压缩波在试样中传播引起的变形不再均匀,这违反了 SHPB 实验中的均匀性假设。对于波速很低的材料,仅仅减小试样的厚度并不能充分满足应力均匀,而采用波形整形技术是解决此问题的有效途径之一。波形整形技术不仅可以促进试样中的应力均匀,还可以得到不同形状的加载波形和恒应变率加载过程,这有利于研究应变率对应力应变关系的影响。本实验在入射杆前端添加了一块直径 13.5 mm 的橡胶片来改变入射波波形,通过延长入射波的上升沿时间,实现动态平衡应力状态下试样的应变率均匀。实验使用的压杆为直径 37 mm 的钢杆,入射杆和透射杆长均为 2 000 mm,子弹长 800 mm。

## 1.2 MTS 准静态实验

静态压缩实验在 MTS810 试验机上进行。图 2 为实验装置示意图。实验过程在保持试样材料相同的同时,试样的成型也与 SHPB 实验中保持一致。

## 1.3 试样制备

所用材料为硅基细颗粒干燥砂,是土木工程和爆破工程中常用的一种材料,经过前期的清洗后,烘干密封保存。实验前,对松散砂进行筛分,颗粒粒径范围为 150~245  $\mu\text{m}$ ,自然堆积状态下干燥砂的密度为 1.40  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

砂子为典型松散介质,实验前必须考虑试样成型的问题,目前主要应用套筒提供侧向约束成型,如图 3 所示:选用钢作为套筒材料,具体尺寸为外径 50 mm、内径 37 mm、长 20 mm。通过 2 个直径 37 mm、厚 10 mm 的钢垫块将干燥砂束缚在钢套筒中,垫块与套筒之间采用紧密润滑配合,确保砂子不会溢出。然后将制作好的试样夹在入射杆和透射杆之间,同时利用支架支撑套筒。

试样成型过程中,由于操作引起的试样不同的初始状态也会对实验结果产生很大影响。砂子试样的初始预压状态是影响压缩实验的一个非常重要的因素。为研究初始预压对实验的影响,制作了施加不同预压的试样。

## 2 实验结果

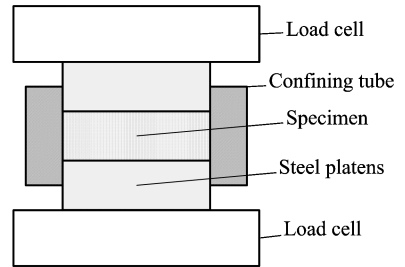


图 2 准静态测试系统示意图

Fig. 2 Schematic of quasi-static test system

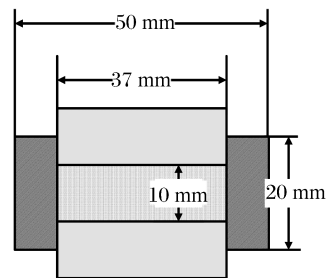


图 3 干燥砂试样

Fig. 3 Specimen of dry sand

详细的实验分组如表 1 所示,分别选取了 2 组不同预压(10、20 MPa)条件的实验进行比较研究,表

中  $p_p$  为预压。预压在液压机上进行,通过液压机可精确控制预压大小。每个试样编号均进行了相同条件的重复性实验,在保证实验可重复的条件下,选取信号相对稳定的波形进行分析。

表 1 动态实验条件

Table 1 Dynamic experimental conditions

$p_p$ /MPa	试样编号	试样尺寸/mm	整形器尺寸/mm	$\dot{\epsilon}$ /s <sup>-1</sup>
10	00	∅37×8.84	∅13.5×1.0	~600
	01	∅37×8.84	∅13.5×1.0	~1 000
	02	∅37×8.84	∅13.5×1.0	~1 600
	03	∅37×8.84	∅13.5×2.0	~1 900
20	10	∅37×8.10	∅13.5×1.0	~600
	11	∅37×8.10	∅13.5×1.0	~1 000
	12	∅37×8.10	∅13.5×1.0	~1 600
	13	∅37×8.10	∅13.5×2.0	~1 900

### 2.1 应力均匀性分析

图 4 是利用 SHPB 实验装置采集得到的典型波形图。由图 4 可知,利用波形整形技术,实验中加载波形的上升沿时间由普通波形的 25  $\mu$ s 提高到约 100  $\mu$ s,相对较长的上升时间使试样中的应力能够较快均匀。由图 5 可知,450~975  $\mu$ s 这段加载时间内,近似满足恒应变率加载条件。

由图 6 可知,不加试样和加试样 2 种情况下,透射波的明显起跳位置相差近 75  $\mu$ s。引起这个现象的原因是自然状态下松散砂波速很低,应力波在试样中第 1 次传播需要比较长一段时间。但是由图 7 可知,经过前期大约 150  $\mu$ s 的应力不均匀状态之后,试样前后端面的应力近似相等,试样变形过程已满足 SHPB 实验所要求的应力均匀状态。由应力波传播理论可知,前端面的应力信号为入射波信号与反射波信号迭加后的结果,后端面的应力信号为透射波信号。如图 7 所示,虽然前期干燥砂试样中波速很低,但是应力均匀后,应力波在试样中传播引起的时间延迟对实验结果影响不大,所以利用公式(1)可计算得到基本满足要求的应力、应变和应变率与时间的关系。

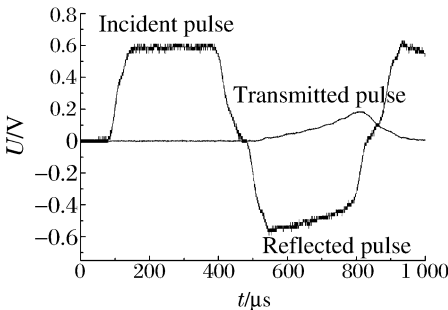


图 4 典型实验原始波形图

Fig. 4 A typical set of oscilloscope record

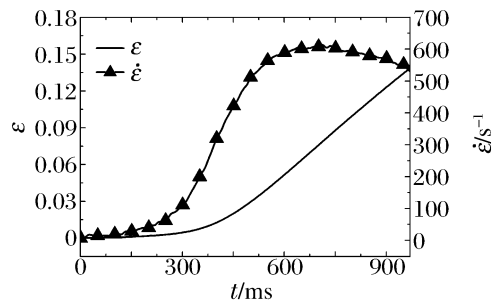


图 5 应变和应变率曲线

Fig. 5 Strain and strain rate curves

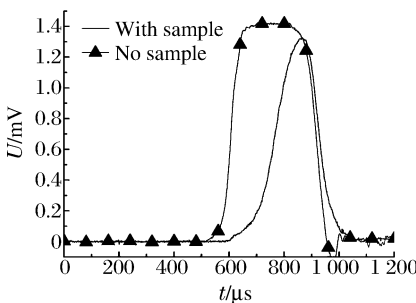


图 6 透射波原始波形

Fig. 6 Oscilloscope record of transmission bar

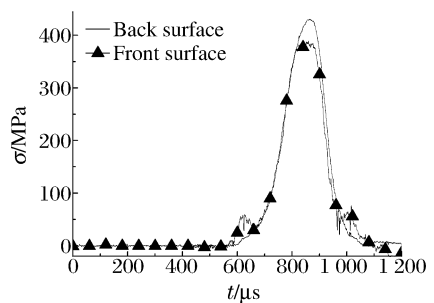


图 7 试件中的动态应力分布

Fig. 7 Dynamic stress distribution in the specimen

### 2.2 不同应变率下干燥砂的压缩性能

在相似的实验条件下,进行了 4 种不同应变率(600、1 000、1 600、1 000 s<sup>-1</sup>)下的动态实验和准静态 MTS 实验(应变率 0.001 s<sup>-1</sup>)。其中图 8(a)是试样在预压 10 MPa 后的实验结果,图 8(b)是预压 20 MPa 后的实验结果。由图可知,除了因为 SHPB 实验前期存在短暂的应力不均匀段,引起动态压缩曲线与准静态压缩曲线之间存在差异外,动态压缩曲线之间,以及动态和准静态压缩曲线基本重合。由此可知,在预压 10 和 20 MPa 条件下,干燥砂试样的压缩过程受应变率的影响很小。

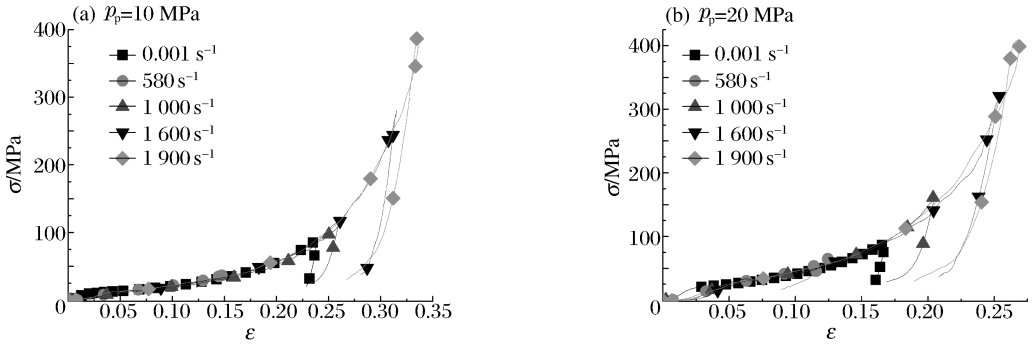


图 8 不同应变率下干燥砂的应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of dry sand at different strain rates

### 2.3 预压对干燥砂压缩性能的影响

为了研究预压对干燥砂压缩性能的影响,在处理实验数据时,预压 10 和 20 MPa 试样的工程应变均相对于试样长度在完全松散状态下的 10 mm 进行计算,实验结果如图 9(a)所示。由图 9(a)可知,相对于预压 10 MPa 试样,预压 20 MPa 试样的动态压缩曲线应变差为一个定值 0.071。而预压后的试件,预压 10 MPa 试样的长度由 10 mm 压缩至 8.84 mm,预压 20 MPa 试样的长度由 10 mm 压缩至 8.10 mm。取 10 mm 作为试件工程应变的原始长度,则由预压所带来的工程应变之差为 0.074,与实验结果 0.071 非常接近。

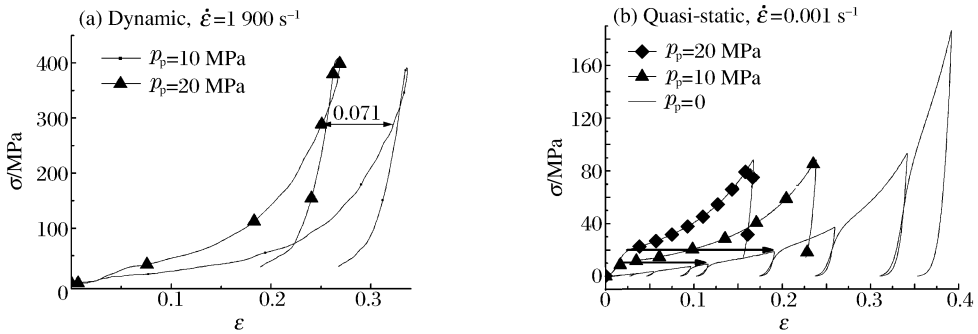


图 9 不同预压状态下干燥砂的应力应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of dry sand under different preloads

由 2.2 节的分析可知,干燥砂的压缩过程受应变率影响不大,且准静态压缩曲线与动态压缩曲线除了前期短暂的不同外,后期基本一致,所以选用准静态压缩曲线来分析预压对于干燥砂压缩性能的影响,如图 9(b)所示。图 9(b)中无预压( $p_p = 0$ )曲线是一个加卸载曲线,分别在 2、4、8、10、20、40、100、200 MPa 卸载到 0.2 MPa,然后再加载。通过定量的分析可知,预压 10 和 20 MPa 后的压缩曲线都属于全程压缩曲线的一部分,二者之间的差值是由前期的预压造成应变起点的移动引起的。

而且由图中加卸载曲线也可发现,循环加卸载虽然有一定的能量损耗,但并没有改变材料整体的压缩应力应变关系,不同初始状态的干燥砂在压缩过程中具有相同的力学特性,但预压会改变初始状态,从而改变压缩应力应变曲线起始点位置。

### 3 结 论

(1)利用添加波形整形器的 SHPB,在充分考虑了动态实验数据的有效性后,得到了不同应变率和不用预压条件下干燥砂的动态压缩应力应变曲线。同时利用 MTS810 材料测试系统,得到了干燥砂的准静态压缩曲线。不论是动态还是准静态实验,试样成型过程均保持一致,数据重复性好。(2)侧限条件下干燥砂的压缩过程与应变率关系不大,预压会造成干燥砂试样压缩过程起点发生变化。干燥砂试样初始状态不一致,会造成干燥砂压缩过程受应变率影响的假象。(3)当前关于砂、土等松散材料的研究多局限于准静态,理论模型多为经验公式。本文工作有助于研究松散材料的动态性能和理论模型。

### 参考文献:

- [1] Felice C W, Brown J A, Gaffney E S, et al. An investigation into the high strain-rate behavior of compacted sand using the split-Hopkinson pressure bar technique[C]//Proceedings of the Second Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures. Florida: Panama City Beach, 1987:391-396.
- [2] 皮爱如,沈兆武,王肖钧.土壤冲击特性的实验研究[J].振动与冲击,2003,22(3):28-29.  
PI Ai-ru, SHEN Zhao-wu, WANG Xiao-jun. Experimental study of impact characteristic of soil[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003,22(3):28-29.
- [3] 李小雷,张振宇,卢芳云.土的动态性能实验研究[J].试验技术与试验机,2006(2):22-24.  
LI Xiao-lei, ZHANG Zhen-yu, LU Fang-yun. Study on the dynamic characteristic of a soil[J]. Test Technology and Testing Machine, 2006(2):22-24.
- [4] Bragov A M, Lomunov A K, Sergeichev I V, et al. Determination of physicomechanical properties of soft soils from medium to high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(9):967-976.
- [5] Song B, Chen W, Luk V. Impact compressive response of dry sand[J]. Mechanics of Materials, 2009,41(6):777-785.

## Dynamic mechanical properties of dry sand under confined compression\*

ZHENG Wen, XU Song-lin, HU Shi-sheng

(CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

**Abstract:** In order to investigate the impact compressive response of confined dry sand, the dynamic compression experiments of dry sand at different high strain rates and different preloads were conducted on the modified split Hopkinson pressure bar(SHPB) with a thin rubber circular plate as a pulse shaper. Quasi-static compressive properties of the sand were obtained with a MTS810 materials test system. The material studied in this research is silica based grain sand, most sand particles are in the diameter range from 150 to 245  $\mu\text{m}$ . The density of the dry sand material is 1.40  $\text{kg}/\text{m}^3$  without preload. The results show that the compression response of the dry sand is not sensitive to strain rate, but significantly dependent on the preload.

**Key words:** solid mechanics; dynamic mechanical properties; SHPB; dry sand; strain rate; preload

\* Received 20 August 2010; Revised 5 January 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (40874093)

Corresponding author: XU Song-lin, slxu99@ustc.edu.cn