

# 动载下高浓度全尾砂胶结充填体的力学特性

杨伟, 张钦礼, 杨珊, 王新民

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 为了研究动载下高浓度全尾砂胶结充填体(HTB)的力学性能, 制备直径×长度为 50 mm×25 mm 的 HTB 试件, 通过静态单轴压缩试验和分离式霍普金森杆(SHPB)单轴冲击试验, 对试件的动静荷载下的力学性质进行比较, 研究试件动态抗压强度、动态应变、强度增强因子、比能量吸收与平均应变率之间的关系。研究表明: HTB 试件对弹性波传播有较强的阻尼作用; HTB 试件临界破坏的平均应变率为  $103 \text{ s}^{-1}$ , 最大应变率可达  $265 \text{ s}^{-1}$ ; 随着应变率增大, 试件的动态抗压强度、动态强度增长因子、峰值应变随之增大, 应变率越高, 达到峰值强度历时越短; 动载下 HTB 试件出现 1~2 次破坏-压实过程; 在低应变率下, 试件沿轴向呈现脆性劈裂破坏, 在高应变率下, 破坏形式为压碎破坏; 随着入射能量增大, 反射能、试块吸收能量及比能量吸收均呈线性增长趋势, 由于波阻抗效应, 透射能较小, 试块具有较强的吸收和反射能特性。

**关键词:** 矿山开采; 高浓度全尾砂胶结充填体; 应变率; SHPB 试验; 动态力学性能

中图分类号: TD835

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)01-0156-06

## Mechanical property of high concentration total tailing cemented backfilling under dynamic loading

YANG Wei, ZHANG Qinli, YANG Shan, WANG Xinmin

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** To study the safety and reliability property of high concentrations of total cemented backfilling (HTB) under dynamic loading, 50 mm×25 mm HTB specimen was prepared, the static uniaxial compression test and the split Hopkinson pressure bar (SHPB) uniaxial impact test were carried out, the mechanical properties between static loading and dynamic loading were compared, the relationship among the stress and the strain of dynamic strain, dynamic compressive strength, the strength enhancement factor, the specific energy absorption and the average strain rate of the test specimen was analyzed. The results show that the HTB specimen has stronger damping effect on elastic wave propagation. Strain rate of damage critical is  $103 \text{ s}^{-1}$ , and the maximum average strain rate can reach  $265 \text{ s}^{-1}$ . With the increase of the average strain rate, the dynamic compressive strength, the dynamic strength and peak strain increase. The higher the strain rate, the shorter time to get the peak strain. Under the dynamic loading, HTB specimen occur 1-2 times failure-compaction processes. Under the low strain rate, specimens present brittle failure along the axial under higher strain rate, and specimens present crushing destruction. With the increase of the incident energy, reflective energy, absorption energy and specific energy absorption progressively increase. Because of the effect of wave impedance, the transmission energy is much smaller than incident energy. HTB has good energy absorption performance.

**Key words:** mining; high concentrations total tailing cemented backfilling; strain rate; split Hopkinson pressure bar (SHPB) test; dynamic mechanics performance

收稿日期: 2016-01-08; 修回日期: 2016-03-22

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51404305) (Project(51404305) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 杨伟, 博士研究生, 从事爆破与充填开采研究; E-mail: yangwei0412104489@126.com

相对于空场法采矿, 充填法采矿具备回收率高、安全程度高、环境污染程度低等特点, 现已广泛用于国内外大型地下矿山中<sup>[1-3]</sup>。目前, 人们对充填采矿进行了大量研究, 新型充填材料渐渐成为研究热点。新型充填材料包括全尾砂胶结充填体、膏体、似膏体等材料<sup>[1-10]</sup>。其中, 高浓度全尾砂充填体(HTB)具有固体物料质量浓度高、早强、输送性能好、水泥用量少等特点<sup>[4]</sup>。人们对高浓度全尾砂充填体的准静态力学特性(应变率低于  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )进行了研究, 如薛希龙<sup>[4]</sup>对黄磷矿 HTB 进行了准静态单轴压缩和劈裂试验, 得到了相关的应力-应变曲线。然而, 矿山开采过程中的爆破等动载荷(应变率高于  $10^2 \text{ s}^{-1}$ )会导致充填体产生损伤、断裂、甚至局部垮塌现象, 给矿山开采带来很多安全隐患。研究材料动态力学特性的理想设备主要是分离式霍普金森杆系统(split Hopkinson pressure bars, 即 SHPB)<sup>[5]</sup>, 采用该系统可研究材料的动态应力-应变-应变率之间的关系<sup>[6-7]</sup>, 也可以研究材料在冲击过程中的能量变化问题<sup>[8-9]</sup>。为了研究动载下高浓度全尾砂胶结充填体(HTB)的力学性能, 本文作者制备直径×长度为  $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  HTB 试件, 进行静态单轴压缩试验; 利用直径为  $50 \text{ mm}$  的 SHPB 试验装置, 以不同速度冲击试样, 测试试样在应变率为  $103 \sim 265 \text{ s}^{-1}$  时的动态力学性能, 分析比较动静荷载下的力学性质, 研究试件动态抗压强度、动态应变、强度增强因子、比能量吸收与平均应变率之间的关系, 以便为其他矿山 HTB 动载下力学性质研究及安全稳定性评价提供 参考。

# 1 HTB 试样制备及静载试验

## 1.1 HTB 试件制备

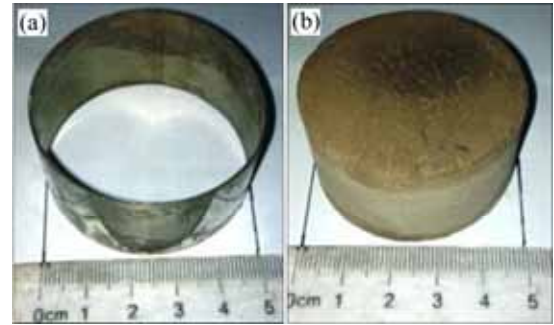
试件采用尾砂是河北某铁矿全尾砂, 所用水泥为 525 号硅酸盐水泥。全尾砂的粒径组成直接影响 HTB 充填试块的物理力学性质<sup>[10]</sup>。表 1 所示为全尾砂粒径组成。从表 1 可知: 尾砂粒度为  $0.075 \text{ mm}$  以下的颗粒质量分数达 69.1%; 中值粒度  $d_{50}=0.049 \text{ mm}$ , 小于一般矿山所用充填尾砂粒度, 可能对胶结充填体强度产生影响。

表 1 全尾砂粒径组成(质量分数)

Table 1 Particle size of backfilling

充填料 粒度/mm	>0.500	(0.250, 0.500]	(0.075, 0.250]	(0.050, 0.075]	[0.005, 0.050]	<0.005
质量 分数/%	0	1.3	29.6	18.1	40.7	10.3

试件料浆灰砂质量比为 1:6, 固体物料质量分数为 75%。试验所用模具为自制直径×长度为  $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  钢管模具, 见图 1(a)。试件制备时, 将拌好的料浆迅速倒入钢管模具内并震荡均匀, 脱模后放入恒温恒湿箱内保养 28 d。图 1(b)所示为已制备的 HTB 试件。



(a) 自制模具; (b) HTB 试件

图 1 HTB 试件及模具

Fig. 1 HTB specimen and mould

## 1.2 HTB 试件静载力学性质

HTB 试块的基本物理力学参数如表 2 所示, 试块 28 d 抗压强度应力-应变曲线如图 2 所示。从图 2 可知: 在静态压缩载荷下, HTB 试件应力在达到最大单

表 2 静载下 HTB 试件的力学参数

Table 2 Static parameters of HTB specimen

灰砂质量比	高度/mm	直径/mm	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
1:6	$25.00 \pm 2.00$	$50.00 \pm 1.00$	$1\ 550 \pm 30$
弹性模量/ MPa	最大应变	抗压强度/ MPa	波阻抗/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
203.46	0.100 605	4.04	$1.55 \times 10^6$

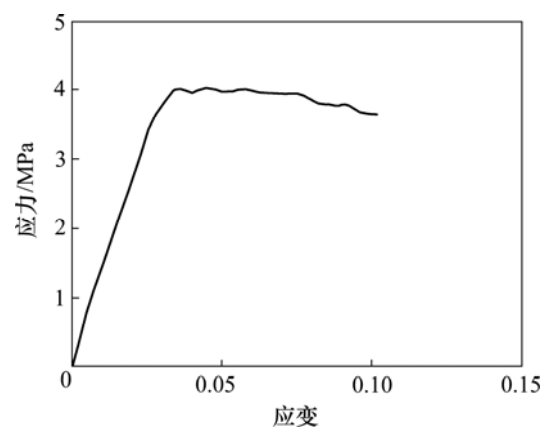


图 2 静载下 HTB 试件(28 d)单轴抗压强度应力-应变曲线

Fig. 2 Relationship between compressive strength stress and strain of HTB specimen after 28 d

轴抗压强度之前具有明显的弹性特征, 应力在达到最大抗压强度之后呈现较强的塑性特性; 随着应变增大, 在完全破坏之前应力仍能保持在 3.5 MPa 以上, 最大应变为 0.100 6。

## 2 SHPB 试验原理

SHPB 试验系统可用于金属、矿岩等多种材料动态力学性能的测试<sup>[11-12]</sup>。图 3 所示为 SHPB 压缩试验原理示意图, 试验系统由发射装置、冲头、入射杆(波阻抗为  $4.23 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、透射杆等组成, 测试试样被夹持在入射杆与透射杆之间, 冲头在高压作用下撞击入射杆, 在入射杆端产生应力脉冲  $\sigma_1(t)$ 。在一维应力传播的条件下, 应力脉冲即弹性应力入射波在入射杆中以波速  $c_0$  向前传播, 与试样接触后分别在入射杆和透射杆中产生反射应力脉冲  $\sigma_R(t)$  和透射应力脉冲  $\sigma_T(t)$ , 试样端部产生入射应变  $\varepsilon_1(t)$  和反射应变  $\varepsilon_R(t)$ , 透射杆同时产生透射应变  $\varepsilon_T(t)$ 。

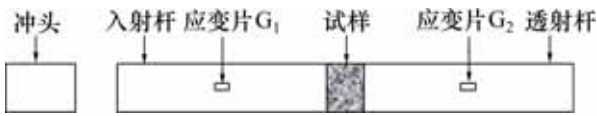


图 3 SHPB 压缩试验原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of SHPB compression test

试块动态应力  $\sigma_s(t)$ 、应变率  $\dot{\varepsilon}_s(t)$  和应变  $\varepsilon_s(t)$  与各应变的关系如下:

$$\sigma_s(t) = \frac{AE}{2A_s} [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{l_s} [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_T(t) - \varepsilon_R(t)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\varepsilon_T(t) - \varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t)] dt \quad (3)$$

式中:  $A$  为入射杆的横截面积;  $A_s$  为试件的横截面积;  $E$  为压杆的弹性模量;  $l_s$  为试件的厚度;  $\varepsilon_1(t)$  为入射杆  $X_{c1}$  处的入射应变;  $\varepsilon_R(t)$  为入射杆  $X_{c1}$  处的反射应变;  $\varepsilon_T(t)$  为透射杆  $X_{c2}$  处的透射应变;  $C_0$  为弹性应力波波速;  $\sigma_s(t)$  为试样的动态应力;  $\dot{\varepsilon}_s(t)$  为试样的应变率;  $\varepsilon_s(t)$  为试样的应变。根据一维应力假定, 当试样应力达到均衡时, 有

$$\varepsilon_T(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t) \quad (4)$$

则式(1)~(3)可化简为

$$\sigma_s(t) = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (5)$$

## 3 动态试验结果及分析

### 3.1 SHPB 设备波形图

试验记录的典型入射波、反射波和透射波波形如图 4 所示。由图 4 可以看出: 入射波与反射波波幅近似相等, 方向相反, 而透射波波幅较小。该现象可用波阻抗理论来解释<sup>[13]</sup>: 当弹性波从高波阻抗材料入射到低波阻抗材料时, 反射波与入射波异号, 透射波应力幅值比入射波的小。由于入射杆的波阻抗 ( $4.23 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 远大于 HTB 试件的波阻抗 ( $1.55 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), 透射波则在应力幅值上远比入射波的小。由图 4 可知 HTB 试件对弹性波传播有较强的阻尼作用。

### 3.2 HTB 试样动态压缩特征及分析

对 HTB 试件在不同应变率 ( $103.19 \sim 265.57 \text{ s}^{-1}$ ) 下进行单轴冲击压缩试验, 所得应力与应变曲线见图 5, 试验基本参数及测试结果见表 3。

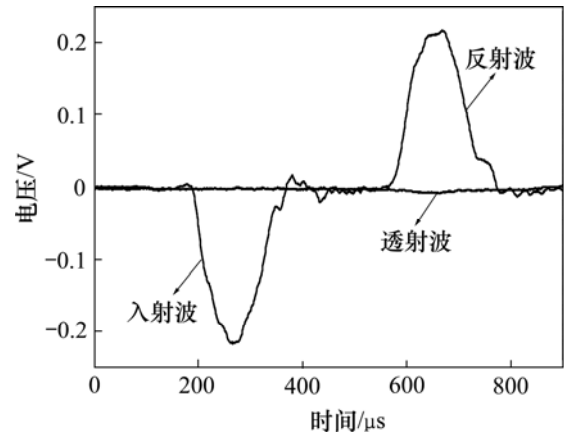


图 4 SHPB 试验装置典型波形

Fig. 4 Typical waveform of SHPB testing

$$K = \frac{\sigma_s}{\sigma} \quad (8)$$

式中:  $K$  为动态强度增强因子;  $\sigma_s$  和  $\sigma$  分别为材料的动、静态抗压强度。在岩石动力学中, 常用  $K$  量化材料动态抗压强度相对于静态抗压强度的增幅<sup>[14]</sup>。对比动、静态单轴压缩试验结果可知:

表3 HTB 试件动态压缩试验结果  
Table 3 Dynamic compression test results

编号	应变率/s <sup>-1</sup>	峰值应力/MPa	峰值应变	残余峰值应力/MPa	动态强度增长因子	峰值时间/ $\mu$ s
A <sub>1</sub>	103.19	4.57	0.000 758	3.35	1.13	19
A <sub>2</sub>	117.71	6.73	0.000 946	4.95	1.67	19
A <sub>3</sub>	138.25	10.11	0.001 085	3.45	2.50	18
A <sub>4</sub>	220.76	14.50	0.001 291	7.41	3.59	18
A <sub>5</sub>	265.57	17.27	0.001 446	7.39	4.27	17

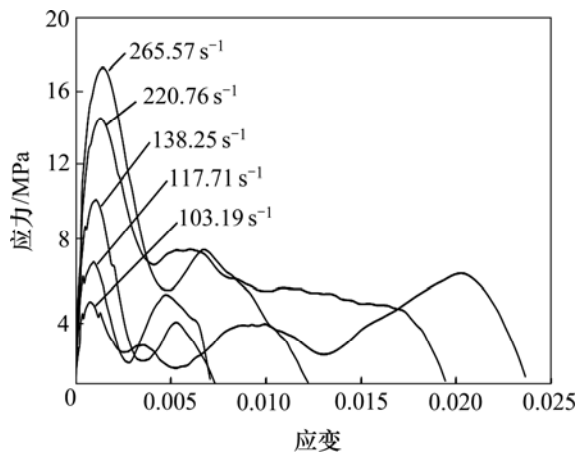


图5 不同应变率下 HTB 试件应力-应变曲线

Fig. 5 HTB specimen stress-strain curves under different strain rates

- 1) HTB 试件临界破坏平均应变率为 103.19 s<sup>-1</sup>, 最大应变率可达 265.57 s<sup>-1</sup>, 比一般岩石的高<sup>[5]</sup>。
- 2) 随着应变率增加, HTB 试件的动态抗压强度也随之增大, 最高可达 17.27 MPa。由图 6 可知试件动态抗压强度与平均应变率呈一定的线性关系。
- 3) 随着应变率增加, 动态强度增长因子显著提高, 最高可达 4.27, 即动态抗压强度是静态抗压强度的 4.27 倍, 而一般岩石的最大动态强度增长因子仅为 1.20~2.50<sup>[15]</sup>。
- 4) 随着应变率增加, 达到峰值强度所用时间从 19  $\mu$ s 降到 17  $\mu$ s, 即应变率越大, 达到峰值强度历时越短, 而一般岩石的达到峰值所用时间为 100~200  $\mu$ s<sup>[16]</sup>。
- 5) 随着应变率的增加, 达到峰值应变呈现递增趋势, 从 0.000 758 增加到 0.001 446; 最大应变在 0.008 675~0.023 636 之间, 远小于试件的静态最大应变。
- 6) 不同于一般脆性岩石动载下应力-应变曲线<sup>[15-16]</sup>, HTB 试件在经历了峰值应力后, 没有马上发生破坏, 而是出现了 1~2 个低应力波峰后才完全破

坏。这是由于试样的应力达到峰值应力后, 试件的一部分开始破坏, 应力开始下降, 同时, 其余未破坏部分的微裂缝也开始被挤压; 随着裂隙被被缩小密实, 应力又逐渐上升, 达到下一个低应力峰值。这种破坏-压实的过程会发生 1~2 次, 直到试件完全破坏为止。

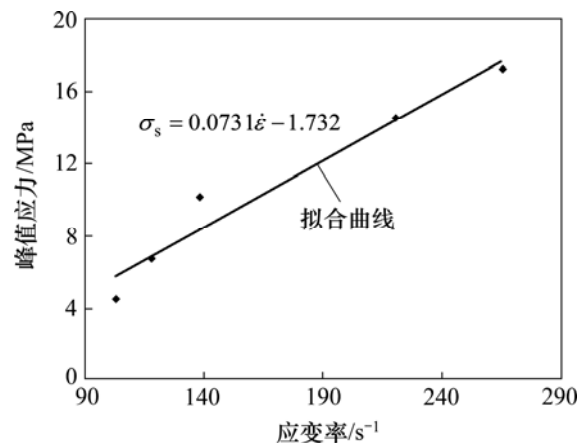


图6 HTB 试件动态抗压强度与平均应变率的关系

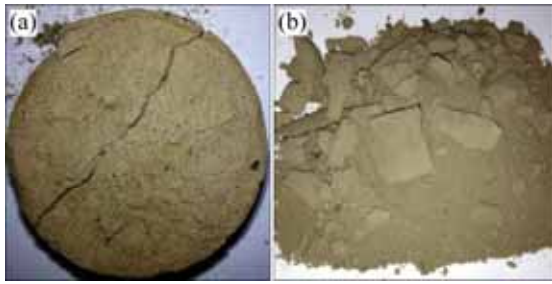
Fig. 6 Relationship between dynamic compressive strength and average strain rate for HTB specimen

### 3.3 HTB 试样动态压缩破坏形式

HTB 试件动态压缩破坏模式见图 7。从图 7 可看出: 应变率越大, 试块的破碎程度越高, 大块率也随之减小; 在临界破坏应变率下, 试件沿轴向呈现劈裂破坏(图 7(a)); 随着应变率增加, 试件碎块数目组建增大, 并伴有粉末出现(图 7(b)); 在最大应变率下, 大部分试件被完全压成粉末, 小块极少。从整体上看, HTB 破坏形式为压碎破坏, 类似于低强度混凝土的破坏形式<sup>[17]</sup>。

### 3.4 动态压缩过程中 HTB 试样能量变化分析

试件在冲击过程中伴随着能量的变化, 入射能  $W_I$ 、反射能  $W_R$ 、透射能  $W_T$  及试块吸收能  $W_s$  之间的关系为<sup>[14]</sup>:



$\dot{\varepsilon} / s^{-1}$ : (a) 103.19; (b) 220.76

图 7 HTB 试件动态压缩破坏模式

Fig. 7 Failure modes of HTB specimen

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \quad (9)$$

$$W_I(t) = EAC_0 \int_0^T \varepsilon_I^2(t) dt \quad (10)$$

$$W_R(t) = EAC_0 \int_0^T \varepsilon_R^2(t) dt \quad (11)$$

$$W_T(t) = EAC_0 \int_0^T \varepsilon_T^2(t) dt \quad (12)$$

式中： $W_I$  为试件的入射能； $W_R$  为试件的反射能； $W_T$  为试件的透射能； $W_S$  为试件的试块吸收能。

能量测试结果见表 4。由表 4 可知，随着入射能量的增大，反射能、试块吸收能量呈线性增长趋势，由于波阻抗效应，透射能较小，几乎可以忽略。

表 4 试验中能量的测试结果

Table 4 Test results of energy

编号	应变率/ $s^{-1}$	入射能/ J	反射能/ J	透射能/ J	吸收能/ J	比能量 吸收量/ $(J \cdot cm^{-3})$
A1	103.19	38.10	35.47	0.15	2.49	0.05
A1	117.71	43.12	38.35	0.18	4.58	0.09
A2	138.25	71.80	66.03	0.11	5.66	0.12
A2	220.76	102.06	93.45	0.16	8.44	0.17
A3	265.57	141.62	131.93	0.17	9.53	0.19

岩石动力学中常用比能量吸收量( $S_{EA}$ )来衡量试件单位体积内吸收能  $S_{EA}^{[16]}$ ：

$$S_{EA} = \frac{W_S}{V_S} \quad (13)$$

式中： $W_S$  为试件吸收的能量，J； $V_S$  为试块体积， $cm^3$ 。由图 8 可知：比能量吸收随应变率的增加而呈线性增加，即应变率越大，试件单位体积吸收的能量越大，最高比能量吸收为  $0.19 J/cm^3$ ，这表明 HTB 试件具有较好的吸能性能。

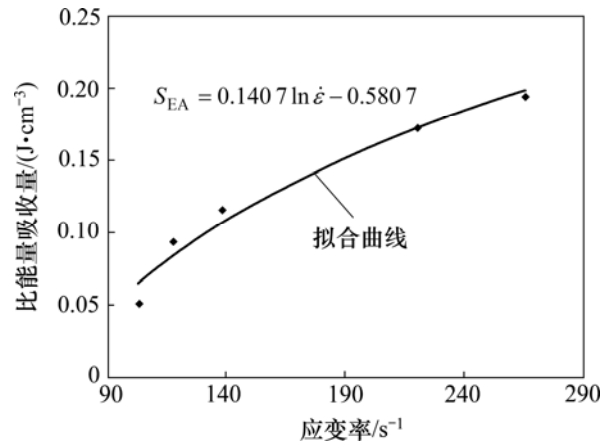


图 8 HTB 试件比能量吸收与应变率关系

Fig. 8 Relationship between energy absorption ratio and average strain rate for HTB specimen

## 4 结论

1) 研究了动载下 HTB(高浓度全尾砂胶结充填体)破坏机理，制备了直径×长度为  $50 mm \times 25 mm$  的 HTB 试件，进行了静态单轴压缩试验和 SHPB 单轴冲击试验。

2) 由于 SHPB 入射杆的波阻抗远大于 HTB 试件的波阻抗，透射波应力幅值远小于入射波的小，说明 HTB 试件对弹性波传播有较强的阻尼作用。

3) 与普通岩石相比，HTB 试件临界破坏的平均应变率较高；随着应变率增加，HTB 试件的动态抗压强度也随之增大，动态强度增长因子显著提高，达到峰值强度历时越短，峰值应变呈现递增趋势，最大应变远小于试件的静态最大应变；动载下 HTB 试件会出现 1~2 次破坏-压实过程，所以，应力在达到峰值后又出现 1~2 个低应力波峰，之后才完全破坏。在临界破坏应变率下，试件沿轴向呈现劈裂破坏，在高应变率下，破坏形式为压碎破坏。

4) 随着入射能量增大，反射能呈增大趋势；由于波阻抗效应，透射能较小，几乎可以忽略。应变率越大，试件单位体积吸收的能量越大，最高比能量吸收为  $0.19 J/cm^3$ ，这表明 HTB 试件具有较好的吸能性能。

5) HTB 作为一种矿山常用充填材料，具有较好的动态抗冲击力性能，当平均应变率低于  $103 s^{-1}$  时，HTB 仍具有较强的承载能力，不会发生整体破坏，并且具有较强的吸收和反射能量的特性，这可为其他矿山 HTB 动态力学性能的研究和安全稳定性评价提供参考。

## 参考文献:

- [1] 张钦礼, 杨伟, 王新民. 湿排粉煤灰似膏体充填采空区试验研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5): 70-72.  
ZHANG Qinli, YANG Wei, WANG Xinmin. Experiment with filling the stope area with the wet paste-like fly ash material[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(5): 70-72.
- [2] HUANG Gang, CAI Sijing, ZHANG Yadong, et al. Experimental and modeling study on the strength of tailings backfill in underground mine[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(522/523/524): 1390-1393.
- [3] FALL M, CÉLESTIN J C, POKHAREL M, et al. A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3/4): 397-413.
- [4] 薛希龙. 黄梅磷矿高浓度全尾砂充填技术研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2012: 36-47.  
XUE Xilong. A study of high density total tailings backfill technology in Huangmei Phosphorus Mine[D]. Changsha: Central South University. School of Resources and Safety Engineering, 2012: 36-47.
- [5] ZHOU Zilong, LI Xibing, YE Zhouyuan, et al. Obtaining constitutive relationship for rate-dependent rock in SHPB tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 697-706.
- [6] MENG H, LI Q M. Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 537-555.
- [7] YANG Bao, TANG Liqun, LIU Yiping, et al. The deformation measurement and analysis on meso-structure of aluminum foams during SHPB test[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2014, 42(3): 8.
- [8] XIE Youjun, FU Qiang, ZHENG Keren, et al. Dynamic mechanical properties of cement and asphalt mortar based on SHPB test[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70(21): 217-225.
- [9] LIU Jie, LIU Jinxu, DING Hongsheng, et al. Study on impact protection properties of titanium alloy using modified SHPB[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 302(2): 14-19.
- [10] WANG Xinmin, ZHAO Bin, ZHANG Chuanshu, et al. Paste-like self-flowing transportation backfilling technology based on coal gangue[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(2): 137-143.
- [11] PERONI M, PERONI L, AVALLE M. High strain-rate compression test on metallic foam using a multiple pulse SHPB apparatus[J]. Journal de Physique IV (Proceedings), 2006, 134(1): 609-616.
- [12] CHEN Rongjun, LIU Hongwei, ZENG Rui. SHPB dynamic experiment on silica fume concrete[J]. Advanced Materials Research, 2013, 631(1): 771-775.
- [13] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 60-90.  
DAI Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 60-90.
- [14] WANG Shasha, ZHANG Minhong, QUEK S T. Effect of specimen size on static strength and dynamic increase factor of high-strength concrete from SHPB test[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2011, 39(5): 10.
- [15] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪. 冲击压缩荷载下角闪岩的动态力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2113-2120.  
LIU Junzhong, XU Jinyu, LÜ Xiaocong. Experimental study on dynamic mechanical properties of amphibolites under impact compressive loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2113-2120.
- [16] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251-260.  
LI Xibing, GONG Fengqiang, ZHAO J, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 251-260.
- [17] QU Jia, ZOU Guangping. A study of the dynamic plane strain fracture toughness of concrete by SHPB[J]. Key Engineering Materials, 2008, 385(7): 21-24.

(编辑 陈灿华)