

# 矿岩料层动态粉碎过程的试验装置<sup>①</sup>

宋守志 邢 军 唐春安 徐小荷

(东北大学采矿系, 沈阳 110006)

## 摘 要

研制了矿岩料层动态粉碎性能测试装置。该装置以火药爆炸产生的高温高压气体作为动力, 推动冲击杆迅速运动, 将冲击载荷以脉冲波形式作用于料层。建立了矿岩料层粉碎力学过程的测试系统。该系统不但可测试料层粉碎初始瞬间所承受的冲击末速度, 而且还可直接捕捉参予试验物料内部粉碎过程的全部载荷信息和全部位移信息。文中给出了三种矿岩试料层的动态载荷位移全过程曲线。

**关键词:** 矿岩料层 动态粉碎 粉碎过程

冲击载荷作用下的矿岩料层粉碎过程有三个基本效应必须考虑, 即惯性效应、应变率效应和粉碎效应。惯性效应决定了处理这一问题时的方法需采用应力波理论; 应变率效应则要求在研究物料的力学响应时考虑应变率的影响; 此外, 还研究其粉碎效果。

Hopkinson J 的钢丝冲击拉伸实验<sup>[1]</sup>有三个重要结论: (1) 控制冲击拉断的主要因素取决于落重的冲击末速度; (2) 冲击拉断的位置处于钢丝的悬挂固定端; (3) 测得的动态屈服强度  $\sigma_{sd}$  约为静态屈服强度  $\sigma_{ss}$  的两倍。前两者主要是试件传播应力波的惯性效应造成的, 后者则反映了材料力学性能的应变率效应。

常规使用的分段 Hopkinson 压杆技术<sup>[2]</sup>适合整体试件, 不便于直接用来研究矿岩料层的动态粉碎。将重物提升一定高度, 靠自由落体来捣碎物料的料层动态粉碎实验装置, 由于获取的冲击末速度变化范围受到限制, 直接影响了其过程和效果的研究。

本文以火药爆炸为驱动力, 设计了一种新型的岩石料层粉碎试验装置, 通过载荷、位移曲线及冲击末速度的测试, 研究其动态粉碎的过程和效果。本试验装置结构简单, 冲击速度

可调范围广泛, 操作方便, 荷载脉冲重复性好, 为矿岩物料的动态粉碎过程研究提供了一种新的试验手段。

## 1 爆炸冲击加载的计算

火药燃烧反应将其潜藏的化学能转变为燃烧产物的热能。本实验装置采用的某双基发射药, 根据理论计算, 其内能为  $-2129 \text{ kJ/kg}$ 。

火药反应时, 发射腔内产生高温高压气体促使传动机构—冲击杆产生高速运动。由热力学定律可表征发射腔能量转换平衡关系, 根据热力学第一定律及定压、定容比热的关系得

$$\frac{\varphi}{2}mv^2 = \frac{\omega\psi R}{k-1}(T_1 - T) \quad (1)$$

$$\varphi = 1.1 + \omega/3m \quad (2)$$

式中  $\varphi$ —装药已燃烧系数;

$R$ —单位质量(kg)火药的气体常数, 其值与定压比热和定容比热有关,  $R = C_p - C_v$ ;

$K$ —火药气体的绝热指数,  $K = \frac{C_p}{C_v}$ ;

$T_1$ —火药气体的初始温度;

$T$ —火药气体做功后的温度;

<sup>①</sup> 国家自然科学基金资助项目 收稿日期: 1993年3月9日; 修回日期: 1993年5月30日

$m$ — 冲击杆质量(kg);

$v$ — 冲击杆速度(m/s);

$\omega$ — 火药质量(kg)

式(1)表明了爆炸加载过程中, 装药量与冲击杆速度之间的函数关系, 其中有关火药性能参数直接可查, 因此冲击末速度可以计算。

## 2 实验装置与测试系统

### 2.1 有关实验方法的假设

基于弹性应力波理论, 我们对实验装置作以下假设:

(1) 矿岩料层在波动过程中的永久位移属于大变形, 因此可以在料层位移曲线测试系统中忽略冲击杆的小变形。

(2) 应力波在料层中往返一次约百余微秒, 在冲击载荷作用的脉冲周期内, 至少可往返7~8次<sup>[4]</sup>。料层经应力波多次反射后, 两个界面应力达到平衡, 可以忽略波在料层中的传播效应。在粉碎过程中, 矿岩料层的应力趋于均匀化, 应变趋于均匀化。

(3) 矿岩料层的底部相当于固定端反射。

### 2.2 料层试样的选择

应力波作用下的矿岩料层性质是它的组分、颗粒大小、结构关系等特征量统计平均结果, 所以料层太薄难于反应加载过程, 同时增加了料层中设置压力传感器的困难。但料层又不能太厚, 否则增加应力波穿透料层的时间, 致使在冲击载荷作用的脉冲周期内, 应力波在料层中的往返次数难于满足假设(2)的要求。选取料层的粒度为10~15 mm, 质量为100 g。在直径50 mm的加载料筒内, 因岩种的变化, 料层厚度为40~60 mm, 料层中的应力波波速约为500 m/s, 应力波在料层中往返一次需120~240  $\mu$ s。冲击载荷作用的脉冲周期, 依冲击末速度不同而变化敏感, 已开展的实验中, 其周期变化在1~5 ms之间。

### 2.3 冲击杆长度的选择

料层内载荷位移关系是一种满足实验料层的应力与应变趋于均匀化的统计平均值。设计

实验装置时, 考虑到图1中的冲击杆5初次冲击到料层9表面的瞬间, 爆炸腔内的生成气体已由发射筒7下部形成的泄漏机构即时排空, 随即封闭了输入实验系统的能量, 因此可以大幅度削减冲击杆的长度, 使实验装置紧凑, 易于微型化。本实验装置, 取杆长 $l = 300$  mm, 杆径 $d = 48$  mm。

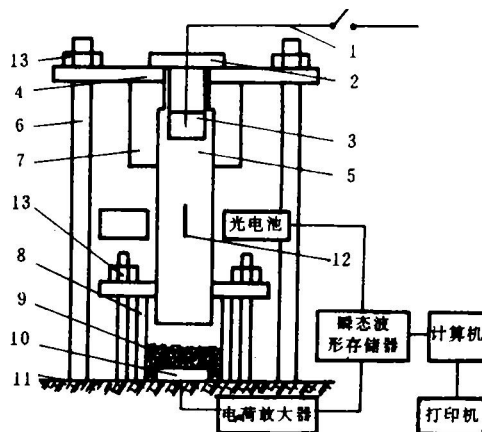


图1 试验装置及测试系统示意图

1—放炮线; 2—预紧螺丝; 3—药筒; 4—支撑板; 5—冲击杆;  
6—支撑杆; 7—爆炸腔; 8—料筒; 9—试样层;  
10—压力传感器; 11—基础; 12—挡光片; 13—拧紧螺丝

### 2.4 料筒的装配方法选择

为使矿岩料层充分吸收冲击载荷脉冲携带的能量, 应满足假定(3)的要求, 创造应力波在料层底部实现近于固定端的反射条件。盛装矿岩试料的料筒, 通过螺钉、压盖与质量相当大的机座紧固成整体, 于是料筒及其机座的总质量与实验物料质量相比, 其值趋于无限大。

### 2.5 测试系统

测试系统如图1所示。在试样内部埋设压电陶瓷型压力传感器10, 将瞬时捕捉到的应力信息, 通过电荷放大器输入到瞬态波形存储器; 利用光电电池作为位移测量的传感元件<sup>[5]</sup>, 同时将料层位移信息也输入瞬态波形存储器。冲击末速度可由位移曲线推出来。利用固紧在冲击杆上的挡光板与测位移传感器相配合, 在冲击杆携带冲击载荷脉冲高速冲击实验料层的瞬间, 完成各参数的测试。

电源接通后, 瞬态波形存储器处于采样等

待状态，冲击杆5紧夹在发射筒上，引爆装药室内的发射药后，由火药反应产生的气体，高速释放推动冲击杆。由于瞬态波形存贮器采用预留地址的内触发方式，依靠荷载信号本身来触发扫描系统工作，因此测试系统不需要附加触发电路。当冲击杆冲击料层时，与瞬态波形存贮器联机的微机系统即可显示、打印或存贮  $F-t$  曲线和  $S-t$  曲线。

放大器的响应频率为 1 MHz，瞬态波形存贮器的最高采样速度为每字 0.1  $\mu\text{s}$ 。

### 3 几种矿岩的测试结果

利用本实验装置对歪头山铁矿石、花岗岩和黄砂岩等十种矿岩试料，进行了多种冲击末速度的料层粉碎实验研究，测定了载荷—时间 ( $F-t$ ) 曲线和位移—时间 ( $S-t$ ) 曲线。根据料层的截面积和厚度，可将这两条实测曲线分别合成为应力—时间 ( $\sigma-t$ ) 曲线和应变—时间 ( $\epsilon-t$ ) 曲线。

歪头山铁矿石、花岗岩和黄砂岩三种矿岩试料，料层的粒度为 10~15 mm，质量为 100 g，冲击末速度为 15 m/s，其  $\sigma-t$  曲线如图 2 所示。

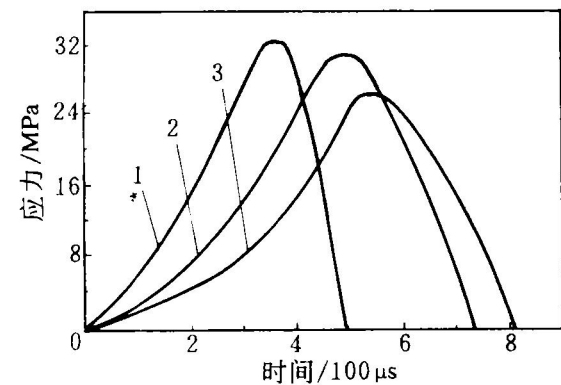


图 2 矿岩的  $\sigma-t$  曲线

1—歪头山铁矿；2—花岗岩；3—黄砂岩

$\epsilon-t$  曲线如图 3 所示。由图 2-1 和图 3-2 的相对关系，载荷的作用时间为 488  $\mu\text{s}$ ，对应的应变为 44.6，其应变率为 912  $\text{s}^{-1}$ 。

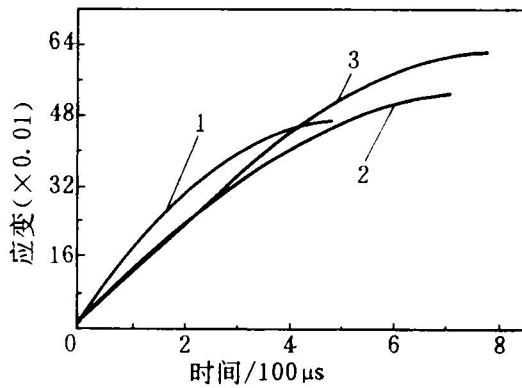


图 3 矿岩的  $\epsilon-t$  曲线

1—歪头山铁矿石；2—花岗岩；3—黄砂岩

### 4 结论

(1) 用爆炸冲击荷载脉冲对矿岩试料层进行动态加载，可用于研究物料粉碎的力学过程和效果，也可用于研究矿岩在动态加载情况下的力学性质。

(2) 本实验装置的设计，形成了封闭的能量系统，它的各部分结构符合应力波的传播规律，使实验料层的应力和应变趋于均匀化，实现了矿岩料层底部的固定端反射，提高了其粉碎过程的能量利用率。

(3) 由压电式压力传感器组成的载荷测试系统，可以直接从实验料层内部准确捕捉到粉碎过程的全部载荷变化信息，为研究矿岩粉碎的内部规律提供了测试手段。

(4) 对歪头山铁矿石、花岗岩和黄砂岩三种试料层进行了动态加载试验，得到了应力应变过程曲线。

#### 参考文献

- 1 Hopkinson J. Collected Sci Papers, 1872, 2: 316.
- 2 Kolsky H. Stress Wave in Solid. Oxford Clarendon, 1963.
- 3 —0三教研室编.《内弹道学》.华东工程学院, 1974.
- 4 陆岳屏, 杨业敏等. 岩土工程学报, 1983, 5(3).
- 5 唐春安, 徐小荷. 爆炸与冲击, 1987, 7(2).