

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0022

# 夹层材料对软硬介质组合岩体动态力学特性的影响\*

王雁冰<sup>1,2</sup>, 宋佳辉<sup>1</sup>, 任 斌<sup>1</sup>, 刘 珍<sup>1</sup>, 龙永东<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;  
2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为研究不同夹层材料下软硬介质组合岩体的动态力学性能及变形破坏特征, 以砂岩和花岗岩为软硬岩基质, 利用分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 装置, 并通过离散格子弹簧法 (discrete lattice spring method, DLSM) 数值模拟, 探究了不同夹层材料下岩体裂纹扩展、夹层界面处的反、透射特性及岩体中能量分配特性。结果表明: 不同夹层材料岩体的动态强度增长因子随着岩体动态抗压强度增大而增大, 表现出明显的动态抗压强度依赖性。不同夹层材料岩体在加载初始阶段存在明显的非线性段, 无夹层岩体砂岩内部闭合的孔隙及裂隙在应力开始作用阶段最久且非线性段最长。随着夹层材料强度的增大, 夹层对岩体的裂纹扩展和发育的阻碍能力逐渐较弱, 岩体产生裂纹和破坏需要消耗的能量逐渐降低。夹层岩体的破坏开始于夹层胶结面处, 随着夹层材料强度的增大, 软岩靠近胶结面一侧破坏逐渐加剧, 硬岩无明显破坏。含夹层岩体具有很好的削波作用, 随着夹层材料强度的降低, 两端面应力峰值在逐渐降低, 夹层岩体短时间内获得的能量吸收密度增大, 稳定性降低, 容易被破坏。

**关键词:** 夹层材料岩体; 裂纹扩展; SHPB; 离散格子弹簧法

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Effect of interlayer material on dynamic mechanical properties of rock mass with combined hard and soft media

WANG Yanbing<sup>1,2</sup>, SONG Jiahui<sup>1</sup>, REN Bin<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, LONG Yongdong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering,  
China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** A split Hopkinson pressure bar (SHPB) device was used to study the dynamic mechanical properties and deformation and failure characteristics of the rock mass combined with different sandwich materials, using sandstone and granite as the soft and hard rock matrix. The discrete lattice spring method (DLSM) was used to further investigate the crack propagation, the reaction and transmission at the interlayer interface and the energy distribution characteristics of rock mass combined with different interlayer materials. The results show that the growth factor of rock mass dynamic strength increases with the increase of rock mass dynamic compressive strength, showing an obvious dynamic compressive strength dependence. The rock mass combined with different interlayer materials has a obvious nonlinear section in the initial loading stage, and the closed pores and cracks in the sandstone of non-interlayer rock have the longest nonlinear section in the initial stress stage. With the increase of the strength of interlayer material, the obstacle ability of interlayer to crack propagation and development of rock mass gradually becomes weak, and the energy consumption of rock mass crack and failure is gradually reduced. The failure of the intercalated rock mass starts at the cementation surface of the intercalated rock mass. With the increase of the

\* 收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2902103); 国家自然科学基金(51934001);  
中央高校基本科研业务费专项资金(2023JCCXLJ02)

第一作者: 王雁冰(1987—), 男, 博士, 副教授, [wangyanbing@cumtb.edu.cn](mailto:wangyanbing@cumtb.edu.cn)

strength of the intercalated material, the failure of the soft rock near the cementation surface is gradually intensified, while the hard rock has no obvious failure. The rock mass with interlayer has a good clipping effect. With the decrease of the strength of interlayer material, the peak stress value of both ends gradually increases and decreases, whilst the energy absorption density of the interlayer rock mass increases in a short time, and the stability becomes worse, so it is easy to be destroyed.

**Keywords:** intercalated rock mass; crack propagation; SHPB; discrete lattice spring method

岩体工程中夹层是指在层状岩体中夹杂有一定厚度的材料, 这些夹层材料可能是岩石破碎带、泥化夹层等, 夹层的力学特性一般同周边岩石的力学特性差异明显。在冲击荷载的作用下, 夹层材料软硬介质组合岩体结构的不连续和不均匀性影响其稳定性, 一是夹层材料对岩体应力波传播影响, 表现为不同夹层材料岩体在冲击荷载下的动力响应; 二是较软弱夹层一般是影响岩体失稳的主要原因, 岩体失稳一般是沿着软弱夹层形成的滑移面。因此, 研究不同夹层材料软硬介质岩体的动态力学特性, 对破岩和保护等有重要意义<sup>[1]</sup>。

国内外学者通过理论分析、数值模拟和试验研究等方法, 对夹层材料组合岩体进行了大量的研究。Kim 等<sup>[2]</sup>利用研制的新型的直剪仪, 在考虑凸角、法向应力、夹层材料类型和厚度等因素的情况下, 对夹层岩体进行了各种试验研究。Vosniakos 等<sup>[3]</sup>通过试验研究了填充锯齿状节理的剪切特性, 确定了关键参数并量化其影响, 然后采用均匀细沙填充的人工(水泥-砂)岩石结构面进行了多次直剪试验用于确定夹层岩体的剪切行为机制。董永香等<sup>[4]</sup>利用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置进行多夹层岩体的低速冲击试验及相应的数值计算, 分析了多夹层对岩体应力波传播特性的影响。刘传正等<sup>[5]</sup>通过理论方法对应力波在夹层内部传播过程中的能量系数的变化规律进行了研究, 分析了夹层平面型边坡中的应力响应特征和动态稳定性。田振农等<sup>[6]</sup>建立了含软弱夹层岩体和爆源的数值模型, 对软弱夹层岩体中爆炸波的传播衰减规律进行了数值模拟。Jia 等<sup>[7]</sup>从理论和试验两方面研究了应力波在夹层岩体中的传播, 并采用时域递推法推导了应力波在夹层岩体中的传播方程。杨仁树等<sup>[8]</sup>采用相似材料模拟制作与真实岩体性质相同的夹层岩体模型试件, 探究夹层材料对岩体动态力学性能的影响。Chai 等<sup>[9]</sup>通过预制不同人工夹层材料岩体, 分析了动态压缩条件下不同夹层材料岩体的强度、变形、波的传播和能量耗散规律。Han 等<sup>[10]</sup>选取致密砂岩作为岩石基质进行室内试验, 研究了 4 种砂浆夹层强度对应应力波传播特性和砂岩-砂浆组合体动态破裂过程的影响规律。杨仁树等<sup>[11]</sup>利用 SHPB 试验系统, 采用波阻抗差别较大的红砂岩和灰砂岩拼接成层状复合岩体试样, 探究岩石工程中较为常见的层状复合岩体的动态力学性能。腾俊洋等<sup>[12]</sup>采用现场所取页岩和灰岩经室内加工拼接成 6 种不同组合方式的层状复合岩体, 研究其在单轴压缩下的损伤破裂过程和声发射特征。

上述研究主要集中在对夹层材料岩体静载下的力学特性<sup>[2-3]</sup>、动载下应力波的传播特性<sup>[4-7]</sup>、相似模拟材料对岩石动态力学性能的影响<sup>[8]</sup>, 以及夹层材料对单一介质岩体<sup>[9-10]</sup>和两种岩性组合体<sup>[11-12]</sup>动态响应及破坏的影响, 而对不同夹层材料的软硬介质组合岩体的动态力学特性及破坏机理研究较少。本文中首先对 4 种不同夹层材料软硬介质组合岩体进行 SHPB 冲击试验, 研究夹层材料变化对软硬介质组合岩体动态强度及强度提高因子、岩体的应力与应变关系、岩体破坏形态、岩体碎块质量与能量关系的影响, 最后通过离散格子弹簧法(discrete lattice spring method, DLSSM)数值模拟, 再现不同夹层材料岩体动态裂纹扩展过程及夹层材料界面处的反、透射特性, 并探究夹层材料变化与软硬介质组合岩体胶结面间的应力衰减和夹层材料岩体中能量分配规律间的关系。

## 1 不同夹层材料软硬介质组合岩体冲击试验

### 1.1 试样制备

试验选用四川自贡采石场较为常见的花岗岩和砂岩。表 1 为 2 种岩石的基本物理力学参数。将加工好的花岗岩和砂岩按照图 1 的设计采用环氧树脂粘结在一起, 忽略粘结厚度。图 1 所示夹层岩体一共

有 4 种, 分别为无夹层、石膏(水膏比为 0.6)、A 材料(河沙、水泥、水的配比 2 : 4.55 : 0.85 的水泥砂浆)和 B 材料(河沙、水泥、水的质量配比为 2.6 : 7.5 : 1.2 的水泥砂浆)。夹层厚度统一为 10 mm, 每种试件 3 个共计 12 个。表 2 为 3 种夹层材料的基本物理力学参数。试验中岩体的长径比为 2 : 1, 较国际岩石力学学会建议的 SHPB 试验中的长径比<sup>[13]</sup>略大。

表 1 岩石基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of rock

岩石种类	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	波速/(m·s <sup>-1</sup> )	波阻抗/(kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	单轴抗压强度/MPa	普氏系数
砂岩	2.48	3350	8308	38.5	3.85
花岗岩	2.63	5415	14241	146.0	14.60

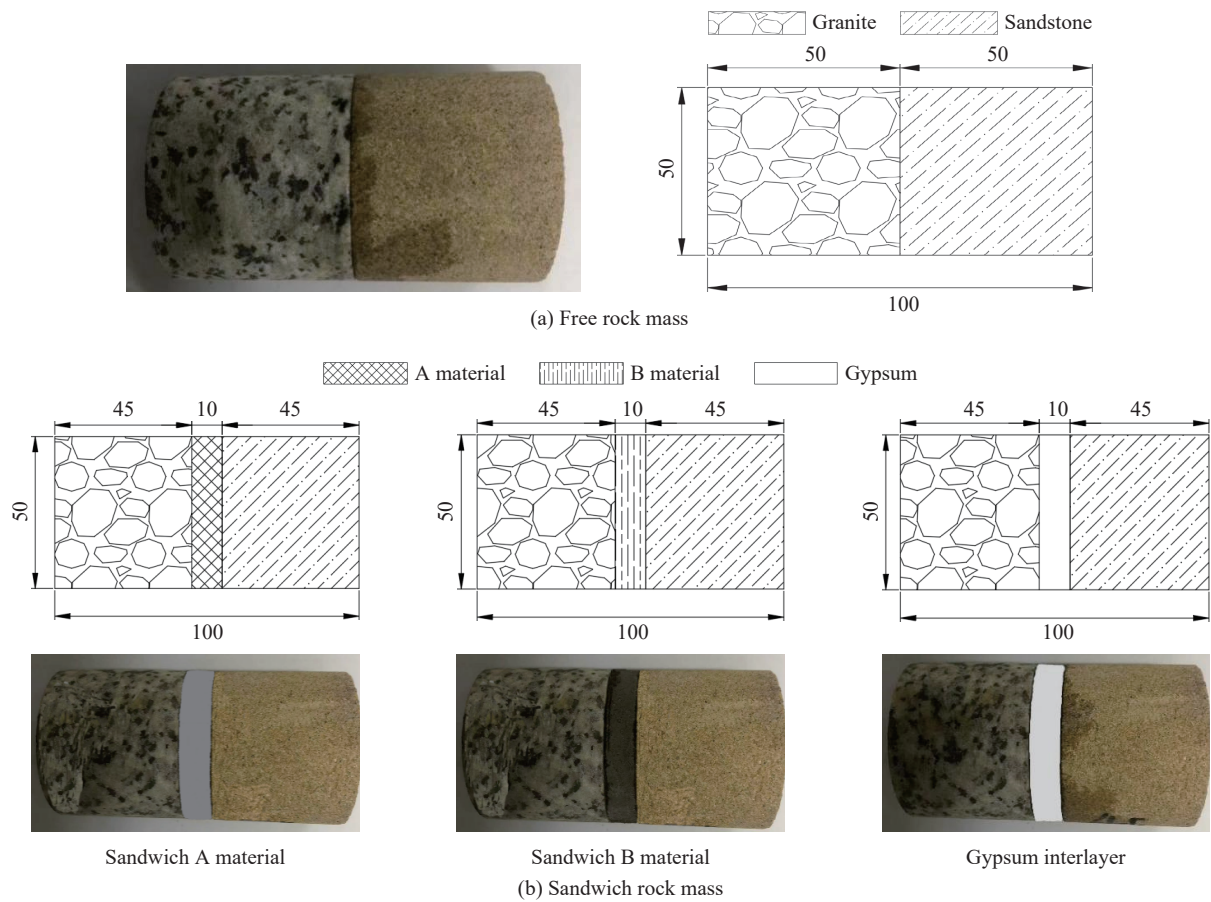


图 1 不同夹层材料的软硬介质组合岩体设计 (单位: mm)

Fig. 1 Rock mass designs of hard and soft media combination with different sandwich materials (unit in mm)

表 2 夹层材料基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of sandwich material

材料类别	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa
A 材料	1.73	14.5	19.6	0.3	13.9
B 材料	1.84	26.9	26.4	0.32	17.2
石膏	1.06	2.5	0.96	0.25	-

### 1.2 动态加载试验系统

组合岩体动态压缩试验在 SHPB 试验系统上完成, 如图 2 所示。系统中, 子弹的直径为 50 mm, 长度为 400 mm; 入射杆的长度为 2 000 mm, 直径为 50 mm; 透射杆的长度为 1 000 mm, 直径为 50 mm; 材质均为合金钢, 密度为 7 900 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 210 GPa, 冲击速度由固定在入射杆前端的激光测速仪测定。

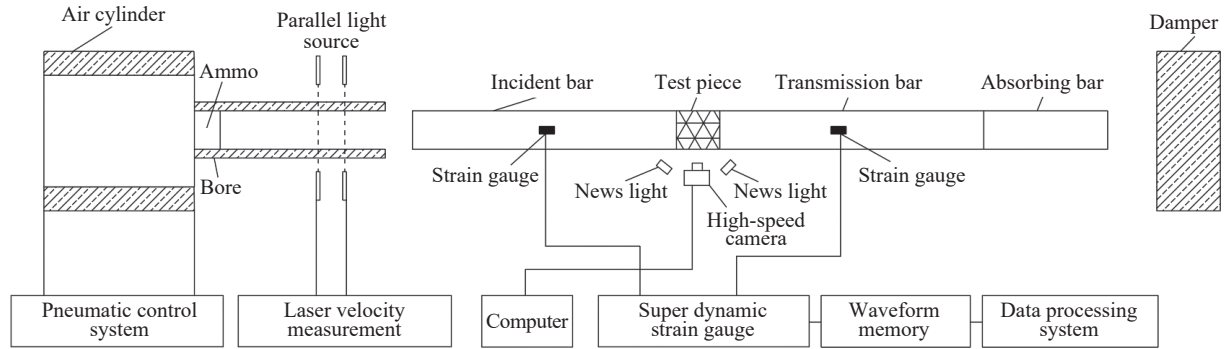


图 2 SHPB 试验系统

Fig. 2 SHPB test system diagram

大量试验表明, 波形整形技术在提高加载波上升沿时间的同时, 有利于促进试件加载过程中应力平衡, 并且对于减少应力波的振荡、弥散也有着良好作用<sup>[14-15]</sup>。本次试验所用波形整形器为橡胶薄片, 其材质为硅橡胶 RTV630, 密度为 1.28 g/cm<sup>3</sup>, 厚度为 1.6 mm, 半径为 10 mm。试验前, 在试件和杆件两端均匀涂抹一层凡士林, 用来降低摩擦效应对试验结果的影响。

### 1.3 应力平衡

在假定一维应力波的基础上通过二波法<sup>[16]</sup>对所得数据处理, 因此本研究中试样在冲击荷载下的应力  $\sigma(t)$ 、应变  $\varepsilon(t)$  和应变率  $\dot{\varepsilon}$  分别为:

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_0} \varepsilon_t \tag{1}$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{L_0} \int_0^t \varepsilon_r dt \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{L_0} \varepsilon_r \tag{3}$$

式中:  $c_0$  为杆件中应力波的传播速度,  $E$  为杆件的弹性模量,  $A$  为杆件的横截面积,  $A_0$  为岩体的横截面积,  $L_0$  为岩体的长度,  $\varepsilon_t$  为岩体的透射应变,  $\varepsilon_r$  为岩体的反射应变。

冲击压缩试验中试件两端的动态应力平衡曲线如图 3 所示, 入射应力  $\sigma_i$  与反射应力  $\sigma_r$  之和与透射应力  $\sigma_t$  近似相等, 表明冲击加载过程中试件处于动态应力平衡状态。试件两端应力之差与其平均值之比为<sup>[17]</sup>:

$$R(t) = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\bar{\sigma}} \tag{4}$$

式中:  $\sigma_1$  为试件与入射杆接触端的应力,  $\sigma_2$  为试件与透射杆接触端的应力,  $\bar{\sigma}$  为试件两端应力平均值。根据计算可得  $R(t)$  为 3.2%, 小于 5%, 可以认为此时试件处于动态应力平衡状态。

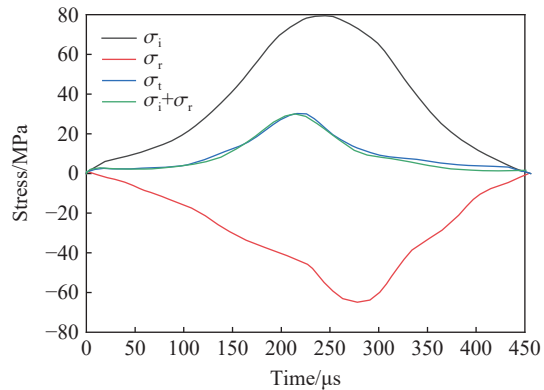


图 3 试件两端动态应力平衡曲线

Fig. 3 Dynamic stress balance curves at both ends of specimen

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同夹层材料下岩体动态强度及强度提高因子

单轴压缩试验所用设备为 MTS815 电液伺服试验机, 在单轴压缩试验过程中通过控制轴向加载位移的方式来控制加载速率, 加载速率控制在 1 mm/min。测得石膏、A 材料、B 材料和无夹层岩体的静态抗压强度分别为 26.15、33.54、35.95 和 36.69 MPa。

试验中控制相同的加载气压(这里取 0.33 MPa), 以实现相近的冲击速度。利用二波法对试验数据进行处理得到不同夹层材料下组合岩体的动态抗压强度, 结果列于表 3。由表 3 可以看出, 不同夹层材料岩体动态的抗压强度随着夹层材料强度的降低在降低。通过计算可得石膏、A 材料、B 材料和无夹层岩体动态强度增长因子<sup>[18]</sup>分别为 1.28、1.42、1.62 和 1.76。

表 3 不同夹层材料岩体的峰值强度

Table 3 Peak strength of rock mass with different interlayer materials

试件编号	夹层材料	加载气压/MPa	冲击速度/(m·s <sup>-1</sup> )	动态抗压强度/MPa	平均值/MPa
WJC-1	无	0.33	8.832	64.60	64.56
0.33		WJC-2	9.171	64.52	
JCA-1	A材料	0.33	8.754	47.84	47.63
0.33		JCA-2	9.130	47.42	
JCB-1	B材料	0.33	8.731	58.85	58.24
0.33		JCB-2	8.457	57.63	
JCS-1	石膏	0.33	8.735	33.13	33.47
JCS-2		0.33	9.256	33.81	

由图 4 可知, 随着不同夹层材料岩体动态抗压强度的增大, 岩体动态强度增长因子也逐渐增大。动态强度增长因子逐渐增大的原因可以从以下 2 个方面进行分析: (1) 动态强度增长因子为试样动态抗压强度和静态抗压强度的比值, 岩体动态抗压强度随夹层强度的增大而增大, 而岩体的静态抗压强度增加并不明显, 因此随着夹层材料强度的增加, 岩体的动态强度增长因子逐渐增大; (2) 夹层材料与岩石是通过环氧树脂粘接起来的, 两者间的结合力会抑制夹层与岩石的非轴向形变。在夹层强度不断提高的同时, 两者间的结合力对非轴向形变抑制作用会逐渐增大, 从而增大了夹层材料岩体的动态抗压强度。由图 4 可知, 岩体动态强度增长因子与动态抗压强度呈正相关, 此时该曲线的表达式应为幂函数, 可通过指数函数表达。在动态抗压强度达到约 50 MPa 后, 岩体动态强度增长因子迅速增大。而随着夹层强度的不断向夹层面左右两侧岩体靠近, 岩体的动态抗压强度及动态强度增长因子增长速度逐渐减缓。

### 2.2 不同夹层材料下岩体的应力-应变关系

在数据处理过程中发现, 相同夹层材料岩体的应力-应变曲线基本一致。从不同夹层材料岩体中各

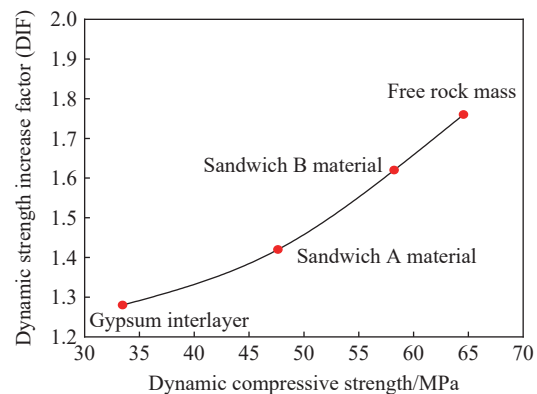


图 4 不同夹层材料岩体动态强度增长因子随动态抗压强度变化

Fig. 4 Relation between dynamic strength increase factor and dynamic compressive strength of rock mass with different sandwich materials

选取一个典型的应力-应变曲线, 分析其应力与应变关系。不同夹层材料下岩体的应力-应变关系见图 5。

由图 5 可知, 不同夹层材料岩体的应力-应变曲线在加载初始阶段存在明显的非线性段。试验所研究含夹层软硬介质组合岩体为各向异性与非均质性材料。试样内部的节理与其他裂隙在较低应力下逐渐闭合, 无夹层岩体砂岩内部闭合的孔隙及裂隙效应在应力开始作用阶段的非线性段最为明显。随后曲线进入线性增长的弹性阶段和受载中期的塑性阶段, 达到峰值强度后应力下降可得到峰后曲线。不同夹层材料岩体在弹性阶段受压发生弹性变形, 此阶段所有曲线均成近似直线上升。随着夹层材料强度的降低, 试件的弹性模量逐渐降低。由曲线斜率可以看出, 无夹层岩体的弹性模量最大, 石膏夹层岩体弹性模量最小。夹层材料的变化导致软硬介质组合岩体两端应力水平不同, 岩体的应力-应变关系存在差异, 进而影响岩体的动态弹性模量。在受载中期的塑性阶段, 不同夹层材料岩体中贮藏的弹性能不同, 因此岩体内部出现的裂纹和裂纹衍生存在明显差异, 进而会影响岩体的形变。由该过程曲线的走势可知, 较软夹层岩体塑性形变速度与应力增大的速度关系紧密, 而无夹层岩体变形最慢。石膏夹层岩体在压应力作用下, 抗压强度较低的石膏极易发生破坏因而更易变形。不同夹层材料岩体的应力峰值存在差异。无夹层岩体的应力峰值最大, 石膏夹层岩体应力峰值最低。随着夹层材料强度的降低, 试件承载力逐渐下降。在应力上升到最大值后岩体逐渐被破坏, 此阶段所有岩体的应力随应变增大而降低。但是应力降低的速度存在明显差异, 这里无夹层岩体产生了脆性断裂。岩体中所贮藏的弹性能被极速释放, 从而导致该曲线直线下降。含夹层岩体应力下降在最开始阶段会留存抗拒变形和破坏的作用力, 因而该阶段岩体应力降低较慢。在无抗拒变形和破坏的作用力时, 应力开始极速降低。且随着夹层材料强度的降低, 岩体应力下降段受夹层面影响越来越显著, 夹层材料强度越高其在破坏阶段抵抗荷载能力越强, 峰后曲线应力降低越慢。

随着夹层材料强度的降低, 试件的弹性模量逐渐降低。由曲线斜率可以看出, 无夹层岩体的弹性模量最大, 石膏夹层岩体弹性模量最小。夹层材料的变化导致软硬介质组合岩体两端应力水平不同, 岩体的应力-应变关系存在差异, 进而影响岩体的动态弹性模量。在受载中期的塑性阶段, 不同夹层材料岩体中贮藏的弹性能不同, 因此岩体内部出现的裂纹和裂纹衍生存在明显差异, 进而会影响岩体的形变。由该过程曲线的走势可知, 较软夹层岩体塑性形变速度与应力增大的速度关系紧密, 而无夹层岩体变形最慢。石膏夹层岩体在压应力作用下, 抗压强度较低的石膏极易发生破坏因而更易变形。不同夹层材料岩体的应力峰值存在差异。无夹层岩体的应力峰值最大, 石膏夹层岩体应力峰值最低。随着夹层材料强度的降低, 试件承载力逐渐下降。在应力上升到最大值后岩体逐渐被破坏, 此阶段所有岩体的应力随应变增大而降低。但是应力降低的速度存在明显差异, 这里无夹层岩体产生了脆性断裂。岩体中所贮藏的弹性能被极速释放, 从而导致该曲线直线下降。含夹层岩体应力下降在最开始阶段会留存抗拒变形和破坏的作用力, 因而该阶段岩体应力降低较慢。在无抗拒变形和破坏的作用力时, 应力开始极速降低。且随着夹层材料强度的降低, 岩体应力下降段受夹层面影响越来越显著, 夹层材料强度越高其在破坏阶段抵抗荷载能力越强, 峰后曲线应力降低越慢。

### 2.3 不同夹层材料下岩体破坏形态分析

不同夹层材料岩体在相同冲击气压下的破坏形态如图 6 所示。从图 6 中可以看到, A 夹层材料在冲击荷载下被压碎, 没有大块, 砂岩有些许碎块。B 夹层材料在冲击荷载作用下被压碎且有较大块, 砂岩超过一半部分被破坏, 较 A 夹层材料岩体砂岩破坏程度较高。石膏夹层由于强度较低, 在冲击荷载作用下被彻底压碎且分散较为严重, 而砂岩只有轻微破坏, 可以忽略不计, 较 A 夹层材料岩体砂岩破坏程度较轻。由图 6 中的破坏形态可知, 夹层材料强度较大时, 砂岩整体沿着主应力方向劈裂, 同时伴有多条轴向裂纹, 此时岩体破坏模式主要为压应力作用下的张拉破坏。夹层材料强度较低, 砂岩整体性较好, 并

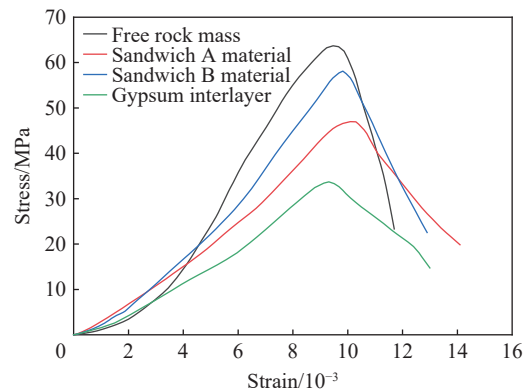


图 5 不同组合岩体夹层材料的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of interlayer materials of different composite rock masses



图 6 不同夹层材料岩体的破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of rock masses with different interlayer materials

未出现明显裂纹。A 夹层材料、B 夹层材料中的砂岩出现部分破碎且 B 夹层材料砂岩表面有轴向贯通裂纹, 认为该轴向贯通裂纹出现是由于在杆件不断冲击作用下被压碎的夹层大块会对岩样有集中作用力, 在集中作用力下砂岩靠近夹层处出现裂纹。在砂岩靠近夹层处出现裂纹后, 随着杆件的持续作用, 裂纹向透射杆方向延伸, 因此在砂岩表面产生轴向贯通裂纹。

#### 2.4 不同夹层材料碎块质量与能量关系

表 4 为不同夹层材料岩体的能耗。从表中可以明显看出, 随着夹层材料强度的降低不同夹层材料岩体的耗散能随之增大。夹层材料由无充填至填充石膏夹层时, 组合岩体耗散能逐渐增大。这主要是由于夹层材料强度降低时, 夹层材料内部孔隙、裂纹等缺陷被活化的数量增多, 迅速失稳开裂扩展, 相互聚集、贯通形成破坏面, 使得破碎部分的颗粒数量增多, 因此耗散能逐渐增大。由表 4 可知, 随着夹层材料强度的增大, 夹层内部胶凝材料强度增大。较小孔洞、内部互通的裂隙降低, 从而导致岩体吸能降低, 进而引起岩体所消耗的能量降低。破碎能耗比与夹层材料强度具有较好的比例, 当夹层材料强度的不断降低, 岩体所消耗的能量逐渐上升。当达到岩体与夹层破坏界限数值后, 作用在孔洞、内部互通的裂隙中的能量将导致岩体表面出现裂纹并逐渐形成断裂面, 夹层在岩体中最先发生破坏, 认为是张拉应力作用下的破坏。夹层在破坏中被碾压成粉末状, 因此所需要消耗的能量值较高。当夹层材料的强度逐渐降低时, 岩体中较小孔洞、内部互通的裂隙越容易被贯通, 孔洞、裂隙中的能量将导致岩体表面出现裂纹并逐渐形成断裂面, 从而引起岩体所需要消耗的能量值较高。若入射能数值相同, 不同夹层材料强度岩体的破碎能耗比由大到小的顺序依次为: 无夹层、B 材料夹层、A 材料夹层、石膏。这主要是由于随着夹层材料强度的降低, 材料更容易被破坏, 其中较小孔洞、内部互通的裂隙逐步贯通导致岩体表面出现裂纹, 并逐渐形成断裂面, 从而提高岩体所需要消耗的能量值。

表 4 不同夹层材料岩体的能耗

Table 4 Energy consumption of rock mass with different sandwich materials

夹层材料	夹层厚度/mm	试件编号	入射能 $E_i$ /J		反射能 $E_r$ /J		透射能 $E_t$ /J		耗散能 $E_d$ /J		碎块质量/g	
			试验值	平均值	试验值	平均值	试验值	平均值	试验值	平均值	试验值	平均值
无夹层	10	WJC-1	364.26	364.21	95.62	96.01	126.77	127.86	138.31	140.34	196.68	188.75
		WJC-2	364.16		96.40		129.01		142.37		180.82	
A材料	10	JCA-1	363.34	365.43	151.28	151.52	68.10	67.20	139.80	146.71	57.54	57.06
		JCA-2	367.52		151.76		66.30		153.62		56.58	
B材料	10	JCB-1	365.02	364.70	124.44	122.13	101.08	99.35	139.50	143.22	137.81	135.56
		JCB-2	364.38		119.82		97.62		146.94		133.31	
石膏	10	JCS-1	367.70	364.86	172.00	176.40	35.29	33.09	156.66	155.37	13.29	14.85
		JCS-2	362.02		180.80		30.89		154.08		16.41	

### 3 不同夹层材料岩体 DLSM 数值模拟分析

DLSM 由赵高峰等<sup>[19]</sup>、Zhao 等<sup>[20]</sup>开发, 作为一种新兴的计算岩石动力学连续-不连续的数值方法, 采用最小二乘法从局部应变方案评估剪切变形, 计算效率较高。关于 DLSM 模型的具体细节及相关应用可参阅文献 [21-22]。

#### 3.1 不同夹层材料岩体模型的建立

图 7 为组合体模型, 模型整体尺寸与试件一致。直径为 50 mm, 高度为 100 mm, 小球颗粒直径为 0.25 mm。岩石与夹层的基本物理力学参数, 详见表 1~2。为研究不同夹层材料界面处的反射与透射变化规律, 在胶结面左右两侧各选取一个尚未失效的监测点 1~2, 两点在一条直线上, 与胶结面的距离相等。在模型中部顶端冠以速度荷载来替代试验过程中的动态荷载, 其加载参数为:

$$v(t) = \begin{cases} v_d t / t_0 & t < t_0 \\ v_d & t \geq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $v_d$  为所施加的动态速率荷载,  $t_0$  为该速率荷载从 0 到给定值所需的时间, 这里对所有模型统一取  $100 \mu\text{s}$ 。

在荷载施加初期, 缓慢增加荷载的幅度可使试件易于达到动力平衡状态。这个上升时间通常取应力波在试件内往返 5 次所需的时间。

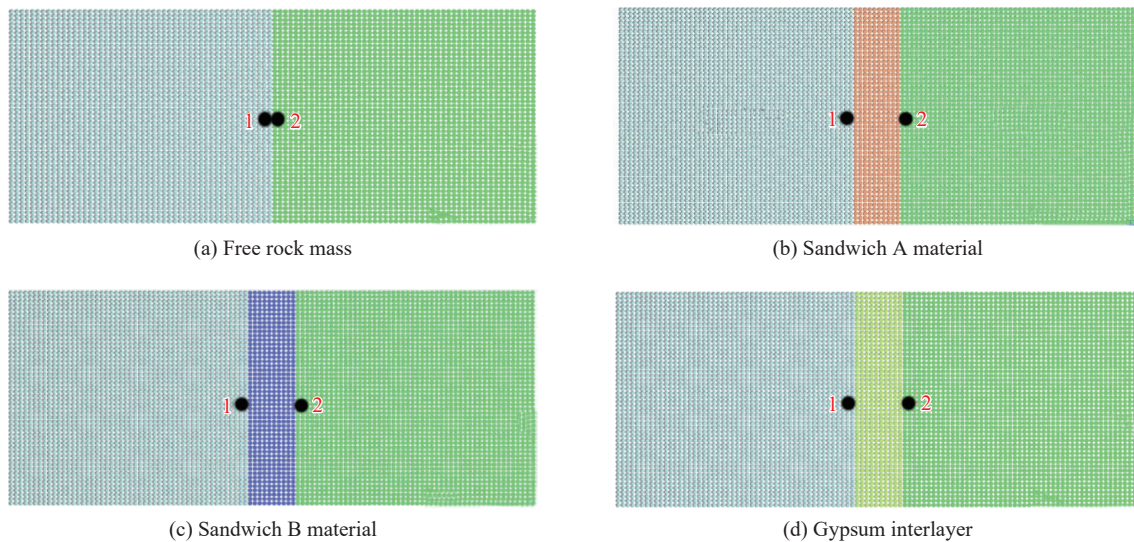


图 7 组合岩体模型

Fig. 7 Combined rock mass models

### 3.2 不同夹层材料岩体动态裂纹扩展过程分析

无夹层材料岩体在冲击荷载作用下裂纹扩展过程如图 8(a) 所示。砂岩端部首先出现裂纹; 随着时间的增长, 砂岩端部裂纹向胶结面处逐渐扩展, 同时胶结面处砂岩出现裂纹和压缩起鼓; 最后, 砂岩与花岗岩分离。砂岩发生剪切破坏, 而花岗岩一侧无裂纹出现。冲击荷载下端部砂岩先于胶结面处砂岩出现剪切破裂面, 随着时间的增长砂岩剪切破裂面不断增大, 最后, 剪切破裂面贯穿整个砂岩。砂岩以剪切破坏为主, 花岗岩并未有明显破坏。图 8(b) 为 A 材料夹层岩体受到冲击荷载作用时裂纹的扩展过程。首先夹层中间处压缩起裂, 有少许片状碎片产生; 随后与花岗岩和砂岩接触的夹层处出现与最大主应力加载方向成一定夹角的主裂纹并出现粉碎区, 该主裂纹属于压应力与剪应力共同作用下的压剪复合裂纹。约  $88 \mu\text{s}$  时胶结面砂岩处产生新的裂纹并进一步向砂岩端部扩展。且此时在裂纹和粉碎区共同扩展下, 夹层与岩石进一步分离, 并有新的片状碎片产生。在岩体破坏阶段, 夹层处片状碎片迅速增多, 夹层处裂纹与粉碎区加速汇聚。在迅速释放的能量以及应力波的透射、反射作用下, 裂纹与粉碎区最终汇聚贯通。夹层呈块状压剪复合破坏, 砂岩有部分裂纹无贯通裂纹。图 8(c) 为 B 材料夹层岩体受到冲击荷载作用时裂纹的扩展过程。可以看出, 首先, 夹层中产生应力集中, 夹层被压缩起鼓。夹层强度低、孔隙多、压缩变形量较大, 导致应力波在夹层中和胶结面处发生较大的反射和透射。在应力集中以及应力波的透射、反射作用下, 夹层与胶结面接触处局部产生裂纹并逐渐分离。随着夹层处裂纹增多, 夹层呈片状剥离。胶结面砂岩处产生新的裂纹, 并进一步向砂岩端部扩展。在岩体破坏阶段, 夹层中能量被释放, 致使大量夹层呈片状剥落, 夹层被破坏。砂岩中裂纹在夹层破坏释放的能量作用下, 部分产生贯通裂纹。在整个加载过程中, 夹层首先被破坏。较软砂岩有部分贯通裂纹出现, 破坏较为严重。B 材料夹层岩体基体的起裂方向与最大主应力方向平行, 最终破坏模式为夹层粉碎性破坏和砂岩部分出现贯通



裂纹。图 8(d) 为石膏夹层岩体受到冲击荷载作用时裂纹的扩展过程。在约  $46 \mu\text{s}$  时胶结面处夹层开始起裂, 形成与最大主应力方向呈一定夹角的劈裂拉伸裂纹并出现粉碎区。随着时间增长, 胶结面砂岩处产生新的裂纹, 并进一步向砂岩端部扩展, 夹层出现片状碎片。约  $89 \mu\text{s}$  时, 夹层处裂纹扩展变宽与粉碎区汇聚贯通, 形成明显的局部断裂。在试件破坏阶段, 汇聚在岩石和夹层内的能量被释放和应力波透射、反射的共同作用下, 夹层出现与最大主应力方向成一定夹角的剪切裂纹, 夹层最终破坏模式为压剪复合型破坏。砂岩有少许裂纹出现无贯通裂纹, 破坏程度较轻。

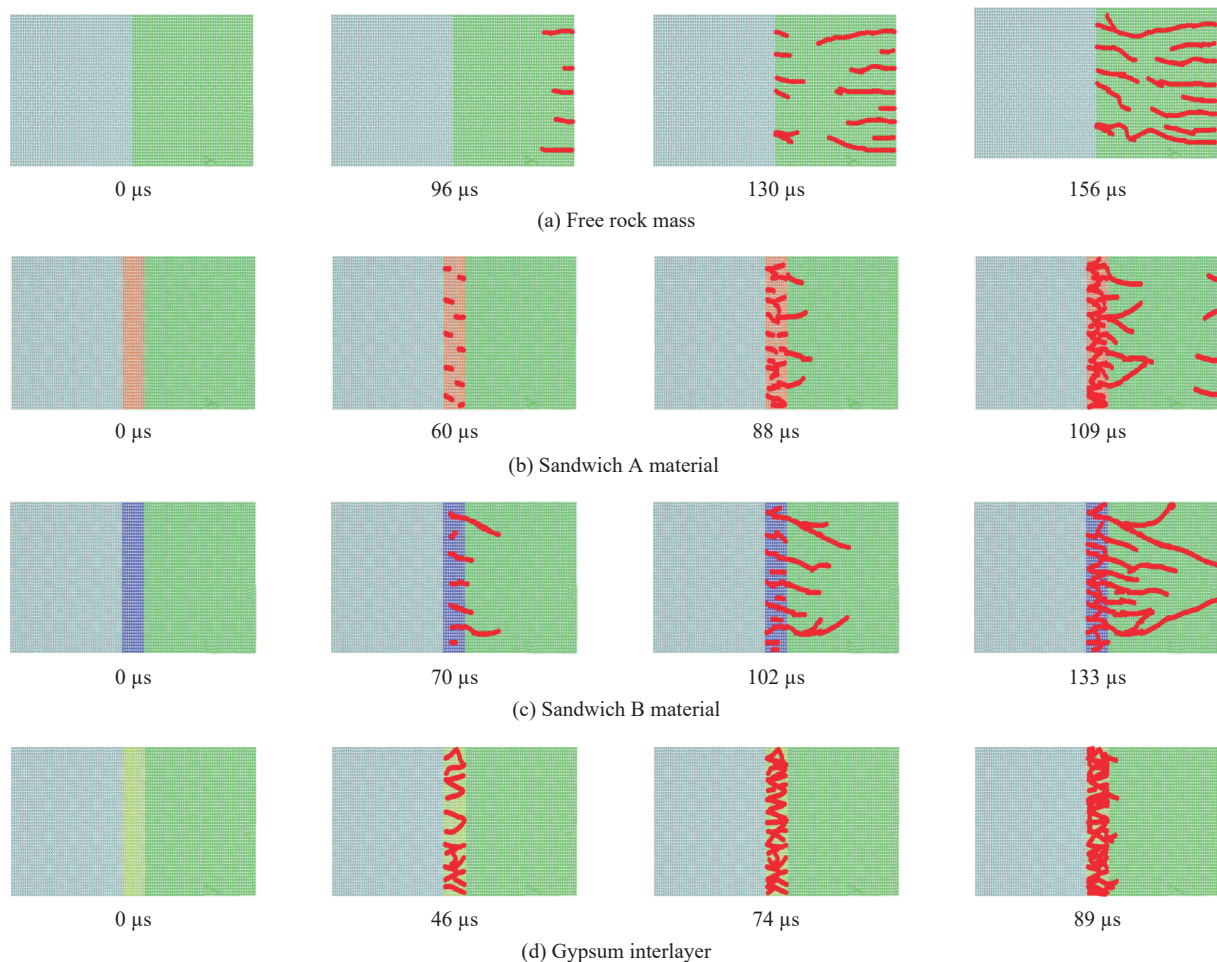


图 8 不同夹层材料岩体的裂纹扩展过程

Fig. 8 Crack propagation processes of rock masses with different sandwich materials

### 3.3 不同夹层材料界面间的应力衰减分析

图 9 为不同夹层材料岩体测点处的应力-时间曲线。相同冲击速度下, 夹层左端面的应力峰值与反射波求得的试件整体应力值相差较小。应力衰减的原因: 一是应力波沿着入射杆向岩体传递而引起的不可忽略的波形弥散和在岩体和夹层处的波形弥散; 二是夹层介质引起的非线性波形弥散。随着夹层强度的增加, 夹层左右端面应力峰值之差逐渐减小。在夹层强度持续增高的同时, 应力峰值衰减幅度会逐渐降低, 左右两端面的应力幅值相差也会逐渐降低。可以看出, 随着夹层材料强度的降低, 两端面应力峰值逐渐降低的同时, 应力峰值差也在逐渐增大。说明含夹层岩体具有很好的抗高速冲击和削波作用。随着夹层强度的降低, 应力逐渐减小。较软夹层的存在, 对较硬材料的岩体有较好的保护作用, 而无夹层岩体应力较大表现出很大的脆性性质, 砂岩被严重破坏, 随着夹层材料强度的降低, 夹层中会有数量较多的孔洞, 这些孔洞稍微施加荷载就会产生破坏。在动荷载的冲击中, 这些孔洞在力作用下被破

坏。孔洞在破碎时会发生较大程度的形变, 在形变过程中需要较多的能量, 因此较大部分应力波中所携带的能量耗散于内部孔洞的破坏过程中。随着夹层强度降低, 夹层两端面应力逐渐降低。岩体中的夹层强度较低时, 夹层的吸能作用使得岩体的应力峰值逐渐下降。

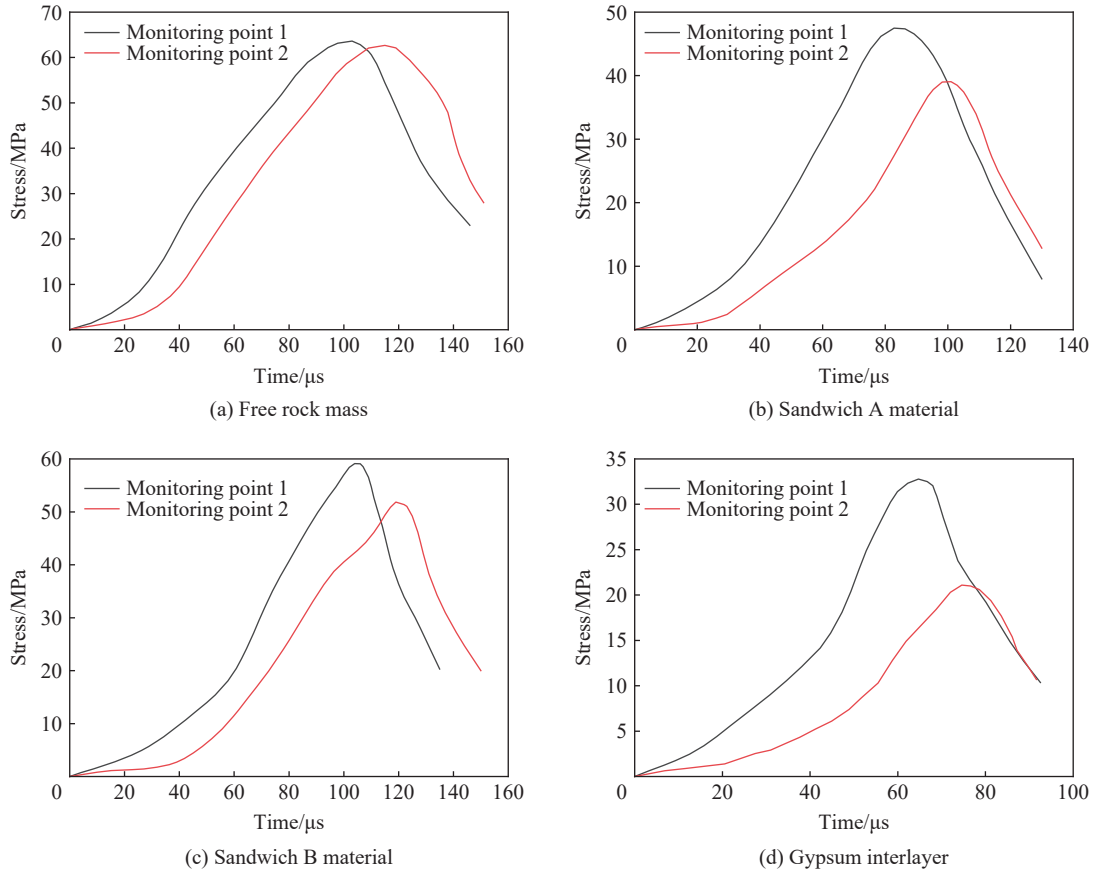


图 9 不同夹层材料岩体测点处的应力-时间曲线

Fig. 9 Stress-time curves of rock masses with different sandwich materials

### 3.4 不同夹层材料岩体中能量分配

为了研究应力波在夹层岩体传播中能量的演化与分配特性, 对每夹层岩体的能量吸收特性进行对比研究。图 10 为不同夹层材料岩体能量吸收密度比较曲线。为更好表示材料与能量吸收密度间的关系, 采用双轴坐标。左侧坐标表示夹层单位面积所吸收能量  $E_j$  和砂岩单位面积所吸收能量  $E_s$ , 右侧坐标表示花岗岩单位面积所吸收能量  $E_h$ 。由图 10 可知, 入射杆相邻的花岗岩的能量吸收密度远大于夹层和砂岩处的能量吸收密度, 超过约一个数量级, 而夹层材料的能量吸收密度又高于砂岩处的能量吸收密度。应力波传递是能量逐渐消耗的过程, 且应力波在夹层处传播时会有一定量的衰减。最先接触应力波的介质中蕴含能量最多, 能量吸收密度最大。对于冲击荷载下岩体的破岩研究而言, 通常希望应力波在夹层处所消耗的能量越多越好, 在冲击荷载一定的情况下, 花岗岩和砂岩的能量吸收密度越小越接近理想状态, 而在岩体的防护设计中则与之相反。3 种夹层材料岩体的能量吸收密度趋于固定不变值所需时间由长到短依次为: B 材料夹层、A 材料夹层和石膏夹层。随着夹层强度的提高, 夹层材料越难起裂与破坏, 且应力波越容易通过强度较高的夹层而传递到砂岩。随着夹层强度的降低, 夹层材料越容易起裂与破坏, 应力波越难通过强度较低的夹层而传递到砂岩, 大部分应力波耗散在夹层处用以夹层的破坏。短时间内获得的能量吸收密度越大, 夹层岩体的稳定性越差容易被破坏。

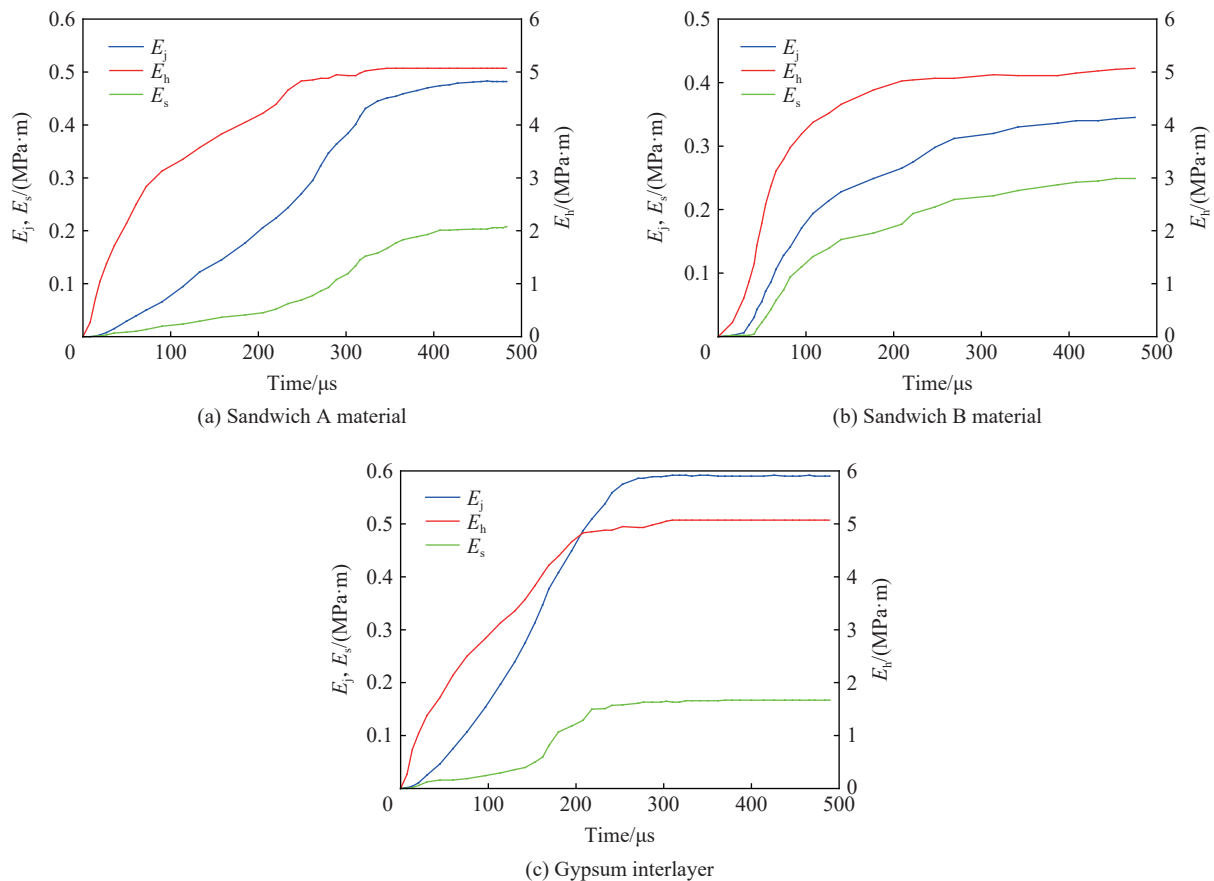


图 10 不同夹层材料岩体能量吸收密度比较曲线

Fig. 10 Comparisons of energy absorption densities of rock masses with different sandwich materials

## 4 结 论

利用 SHPB 和 DLSM 数值计算, 对不同夹层材料软硬介质组合岩体冲击动力学特性进行研究, 结论如下:

(1) 冲击荷载下, 不同夹层材料岩体动态强度增长因子随着岩体动态抗压强度的降低而减小。动态强度增长因子与岩体动态抗压强度正相关, 两者之间具有幂函数或指数函数关系。不同夹层材料岩体的应力-应变曲线在加载初始阶段存在明显的非线性段, 无夹层岩体砂岩内部闭合的孔隙及裂隙效应在应力开始作用阶段的非线性段最为明显。随后曲线进入线性增长的弹性阶段和受载中期的塑性阶段, 达到峰值强度后应力逐渐降低。

(2) 夹层材料强度较高并与其中一侧材料强度相差较小时, 试样中和夹层材料强度相同的那部分岩石材料整体沿着主应力方向劈裂, 而中间的夹层材料被压碎有少许大块。当夹层材料强度较低并与两侧材料强度相差较大时, 组合试件中材料强度较弱那部分岩石只有少许裂纹出现, 而中间的夹层材料被完全压碎无任何大块。随着夹层材料强度的降低, 夹层材料容易被破坏, 岩体内部缺陷在活化、扩展、贯通形成破坏面的全过程中所消耗的能量增多。

(3) 根据试验和 DLSM 数值计算结果可知, 夹层材料岩体的破坏发端于夹层胶结面处, 当夹层强度较高时, 砂岩因贯通裂纹出现而发生破坏且同胶结面接触处砂岩破坏较为严重。随着夹层强度的降低, 砂岩只有靠近胶结面一侧产生局部裂纹。

(4) 含夹层岩体具有很好削波作用。随着夹层强度的降低, 两端面应力峰值在逐渐降低的同时差值逐渐拉大。与入射杆相邻的花岗岩的能量吸收密度远高于夹层和砂岩处的能量吸收密度, 超过约一个

数量级, 而夹层材料的能量吸收密度又高于砂岩处的能量吸收密度。随着夹层强度的降低, 短时间内获得的能量吸收密度增大。夹层岩体的稳定性越差容易被破坏。

### 参考文献:

- [1] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.  
XIA C C, SUN Z X. Engineering rock joint mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [2] KIM Y, LEE Y, DO S. Basic study on shear characteristics of filled rock joint [J]. Tunnel and Underground Space, 2004, 14(5): 318–326.
- [3] VOSNIAKOS K, PATRONIS C, LANE P. Physical and numerical study of shear behavior of filled rock joints using DEM [J]. Journal of Environmental Protection and Ecology, 2010, 11(4): 1591–1602.
- [4] 董永香, 黄晨光, 段祝平. 多层介质对应力波传播特性影响分析 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(1): 59–65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2005.01.011.  
DONG Y X, HUANG C G, DUAN Z P. Influence of multilayer media on stress wave propagation characteristics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 59–65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2005.01.011.
- [5] 刘传正, 张建经, 崔鹏. 岩体夹层应力波能量演化及应力响应特征分析 [J]. 岩土力学, 2018, 33(6): 2267–2277. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1836.  
LIU C Z, ZANG J J, CUI P. Evolution of laminated rock mass stress wave energy and stress response characteristics analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 33(6): 2267–2277. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1836.
- [6] 田振农, 张乐文. 岩体中软弱夹层影响爆炸波传播规律的数值分析 [J]. 沈阳工业大学学报, 2010, 32(3): 349–354.  
TIAN Z N, ZHANG L W. Numerical analysis of blast wave propagation in rock mass containing weak interlayer [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(3): 349–354.
- [7] JIA S L, WANG Z L, WANG J G, et al. Experimental and theoretical study on the propagation characteristics of stress wave in filled jointed rock mass [J]. Plos One, 2021, 16(9): 392–405. DOI: 10.1371/journal.pone.0253392.
- [8] 杨仁树, 王茂源, 杨阳, 等. 夹层材料对节理岩石动力学性能影响的模拟试验 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(12): 125–131. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.019.  
YANG R S, WANG M Y, YANG Y, et al. Simulation test of effect of filling materials on dynamic performance of jointed rock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 125–131. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.019.
- [9] CHAI S B, WANG H, YU L Y, et al. Experimental study on static and dynamic compression mechanical properties of filled rock joints [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2020, 17(3): 1590–1605. DOI: 10.1590/1679-78255988.
- [10] HAN Z Y, LI D Y, LI X B. Dynamic mechanical properties and wave propagation of composite rock-mortar specimens based on SHPB tests [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(4): 793–806. DOI: 10.1016/J.IJMST.2022.05.008.
- [11] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 层状复合岩体冲击动力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1747–1757. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0021.  
YANG R S, LI W Y, FANG S Z, et al. Experimental study on impact dynamics of layered composite rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1747–1757. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0021.
- [12] 腾俊洋, 唐建新, 王进博, 等. 层状复合岩体损伤演化规律及分形特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3263–3278.  
TENG J Y, TANG J X, WANG J B, et al. Damage evolution and fractal characteristics of layered composite rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3263–3278.
- [13] DAI F, HUANG S, XIA K W, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 657–666. DOI: 10.1007/s00603-010-0091-8.
- [14] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 等. 脆性材料 SHPB 实验技术的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003(11): 1798–1802. DOI: cnki:sun:yslx.0.2003-11-009.  
WANG L M, ZHAO J, HUA A Z, et al. Study on experimental techniques of SHPB for brittle materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(11): 1798–1802. DOI: cnki:sun:yslx.0.2003-11-009.

- [15] 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 413–418.  
TAO J L, TIAN C J, CHEN Y Z, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(5): 413–418.
- [16] 卢芳云, 陈玉亮. 霍普金森杆实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
LU F Y, CHEN Y L. Hopkinson bar experiment technique [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [17] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 207–216.  
SONG L, HU S S. Uniformity and constant strain rate in SHPB test [J]. *Explosion and Shock waves*, 2005, 25(3): 207–216.
- [18] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪, 等. 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.10.020.  
LIU J Z, XU J Y, LU X C, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of amphibolite under impact compression load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2113–2120. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.10.020.
- [19] 赵高峰, 乔磊, 张玉良, 等. 适用于非均质岩石破坏模拟的偏心四维弹簧模型 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2021, 61(8): 818–826. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.26.014.  
ZHAO G F, QIAO L, ZHANG Y L, et al. Eccentric four-dimensional lattice spring model for heterogeneous rock fracturing [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(8): 818–826. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.26.014.
- [20] ZHAO G F, FANG J, ZHAO J. A 3D distinct lattice spring model for elasticity and dynamic failure [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35: 859–885. DOI: 10.1002/nag.930.
- [21] ZHAO G F, JIANG C. Implementation of a coupled plastic damage distinct lattice spring model for dynamic crack propagation in geomaterials [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018, 42(4): 674–693. DOI: 10.1002/nag.2761.
- [22] 王雁冰. 爆炸的动静作用破岩与动态裂纹扩展机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2016.  
WANG Y B. Study on the mechanism of rock breaking and dynamic crack propagation under the dynamic and static action of explosion [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.

(责任编辑 王易难)