

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.001

冲击荷载作用下软硬互层岩体的动力特性^{*}

王智德¹, 周泉涌¹, 钱梦凡¹, 柯宏博¹, 吝曼卿^{2,3}, 祝文化¹

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 武汉 430205;
3. 磷资源开发利用教育部工程研究中心, 武汉 430205)

摘要: 岩体中的软硬互层结构是导致岩体各向异性的主要因素之一。针对该类岩体在工程爆破作用下表现出的复杂动力学响应特征, 设计了6种软硬互层组合形式及4种不同硬岩占比的类岩试样, 通过开展冲击试验, 系统研究了软硬互层岩石的动态力学特性、能量耗散规律及其破坏模式。研究表明: (1) 随着试样中硬岩占比的增加, 其峰值应力逐渐增大; 而随着试样层数的增加, 峰值应力呈小幅降低趋势。 (2) 随着硬岩占比的增加, 能量反射系数逐渐减小, 能量透射系数与能量吸收率逐渐增大; 随着试样层数的增加, 能量反射系数逐渐增大, 而能量透射系数与能量吸收率逐渐减小。此外, 与冲击端为软岩的试样相比, 冲击端为硬岩的试样具有更小的能量反射系数和更大的能量透射系数及能量吸收率。 (3) 随着试样中硬岩占比的增加, 试样整体破坏程度逐渐减弱, 其破坏模式由以多共轭斜面剪切破坏为主逐渐转变为以劈裂破坏为主; 而随着试样层数的增加, 试样破坏程度明显加剧。

关键词: 相似材料; 软硬互层岩体; SHPB; 动力特性; 能量耗散

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0001-12

Dynamic Characteristics of Hard-soft Interbedded Rock Mass under Impact Loading

WANG Zhi-de¹, ZHOU Quan-yong¹, QIAN Meng-fan¹, KE Hong-bo¹, LIN Man-qing^{2,3}, ZHU Wen-hua¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 3. Engineering Research Center of Phosphorus Resources Development and Utilization of Ministry of Education, Wuhan 430205, China)

Abstract: The soft-hard interbedded structure represents a key contributor to rock mass anisotropy. This study examines the dynamic response of such formations under blasting loading through impact tests on six soft-hard interbedded configurations and four groups of rock-like specimens with varying hard rock ratios. Systematic analysis was conducted on dynamic mechanical properties, energy dissipation characteristics, and failure mechanisms in these

收稿日期 (Date of reception): 2025-11-05

网络首发日期 (Published online): 2025-12-09

作者简介: 王智德 (1983-), 男, 湖南湘潭人, 博士、高级实验师、硕士生导师, 主要从事岩土工程爆破方面的教学与科研工作, (E-mail) wangzhide-wuhan@whut.edu.cn。

通信作者: 祝文化 (1966-), 男, 河南信阳人, 硕士、副研究员, 主要从事岩土工程的教学与科研工作, (E-mail) jyzwh@whut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42077228, No. 52174085); 磷资源开发利用教育部工程研究中心开放基金资助 (No. LKF202004); 武汉市城乡建设委员会科技计划项目 (编号 201740, 201941)

About the author: WANG Zhi-de (1983-), male, born in Xiangtan city, Hunan province, Ph. D, senior experimenter, master supervisor, mainly engaged in the research of geotechnical engineering blasting and excavation design, (E-mail) wangzhide-wuhan@whut.edu.cn.

Corresponding author: ZHU Wen-hua (1966-), male, born in Xinyang city, Henan province, master degree, associate researcher, mainly engaged in the teaching and scientific research of geotechnical engineering, (E-mail) jyzwh@whut.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (42077228, 52174085), Open Project of Engineering Research Center of Phosphorus Resources Development and Utilization of Ministry of Education (LKF202004), Science and Technology Program of Wuhan Municipal Urban-Rural Development Bureau (No. 201740, 201941)

composite rock systems. Results demonstrate that: (1) Specimen peak stress exhibits progressive enhancement with increasing hard rock content ratio, while displaying a marginal declining trend as layer quantity increases. (2) Increasing hard rock content reduces the energy reflection coefficient while enhancing both the energy transmission coefficient and absorption rate. Conversely, greater layer thickness increases energy reflection but diminishes the transmission and absorption coefficients. Notably, specimens impacted from the hard rock side demonstrate lower reflection coefficients but higher transmission coefficients and absorption rates compared to those impacted from the soft rock side. (3) As the hard rock content increases, the specimens exhibit progressively reduced overall damage severity, with the predominant failure mode transitioning from multi-directional conjugate shear fractures to tensile splitting. Conversely, increasing the number of layers markedly amplifies the intensity of specimen damage.

Key words: similar materials; Hard-soft Interbedded Rock Mass; SHPB; dynamic properties; energy dissipation

软硬互层是岩体中比较常见的地质结构类型,广泛分布于我国西南地区^[1]。岩层之间存在明显分界面并具有显著的各向异性,使得其在抗压强度、弹性模量、泊松比以及波阻抗等方面均表现出与均质岩体截然不同的复杂力学行为。在层状与非均质岩体方面,国内外研究主要集中在静力学性质、动力响应机制以及能量耗散规律三个方向。

国外研究较早采用相似材料与分层试样揭示层理倾角对岩体强度与变形的影响,如 Tien 等通过单轴、三轴试验系统地分析了层理倾角对复合岩体强度和弹模的作用机制^[2,3]。Tavallali 等利用巴西劈裂试验进一步揭示层理倾角对抗拉强度的影响规律^[4,5]。国内研究则基于天然页岩、灰岩等开展声发射、CT 扫描等试验手段^[6],从损伤演化角度丰富了对层状岩体破坏机理的认识;Li 等^[7]、王胜伟等通过系统的实验与数值方法探讨了变形特征及损伤模式^[8]。在动力响应研究中,国内外大多采用分离式霍普金森压杆(SHPB)系统。Zhao 等揭示了层理倾角对动态抗拉强度及破坏模式的影响^[9];田栩帆等从能量传递角度分析节理倾角作用^[10];王雁冰等研究了软硬界面区域的应力时程演化规律^[11];Qiu 等发现结构面倾角对应力波传播与动态拉伸性能的影响相对有限^[12];李成杰等通过不同组合体试样获得了能量耗散与破碎特征规律^[13]。

总体而言,现有研究虽对层状岩体的静动力力学行为、应力波传播特性及能量耗散规律取得了丰富成果,但专门针对软硬互层结构类型岩体的动力响应、破坏模式及能量演化的系统研究仍相对不足,尤其是在不同硬岩体积占比、层数及组合方式对动力行为影响方面尚缺乏实验数据支撑。

基于此,本文依托实际工程,采用相似材料制备不同结构参数的软硬互层岩样,通过 SHPB 冲击试验系统地研究岩样的动力力学特性、能量耗散规律、典型破坏模式。旨在揭示软硬互层岩体在冲击荷载

作用下的动力响应机制,为提高工程爆破设计的精度提供理论依据和实验基础。

1 试验简介

1.1 试样制备

云南某高速公路顺层岩质边坡,其岩体以页岩夹灰岩互层形式存在,现场采用爆破开挖方式。因取样难以保证其完整性,根据材料相似原理,采用类岩材料模拟原岩样,为了使力学参数与岩体接近,参考现有的成果^[14-16],通过系列试验确定类岩材料采用 P. O42.5 普通硅酸盐水泥、粒径小于 2.5 mm 的天然河砂、石膏及水。其中硬岩质量配比为水泥:砂:水 = 3:3:1;软岩为水泥:石膏:砂:水 = 2:0.2:4:1。

为研究软硬互层岩体中硬岩体积占比、层数等对动力特性的影响,除完整软岩、硬岩外设计以下 6 类互层试样,其中冲击试样的尺寸为 $\phi 50 \times 50$ mm,每种类型试样分别制作 3 个,如图 1 所示。试样命名规则如下,如试样 SH4,代表软岩(Soft rock)-硬岩(Hard rock)的组合方式,4 代表硬岩体积占比为 40%,靠近入射杆的一端为软岩。双层试样硬岩体积占比分别为 20%、40%、60%、80%;而三层、四层试样考虑个别岩层厚度更小,制备过程中误差影响大,硬岩体积占比分别为 30%、40%、50%、60%,考虑层数因素时,取 40%、60%的交集进行对比,其中硬岩占比 0 和 1.0 的分别代表完整软岩和硬岩。在实验过程中,对每组试样进行 3 次重复实验以降低随机误差,试验数据以 3 个试件的平均值作为该工况下的代表值,并辅以标准差与变异系数(CV)对离散性进行表征。见图 2。

试样的基本物理力学参数如表 1 所示。

1.2 试验装置及原理

SHPB 装置包括控制系统、空压装置、冲击杆、入射杆、透射杆、缓冲装置和信号采集系统,如图 3 所示。其中冲击杆、入射杆和透射杆材质为高强度

合金,直径为 60 mm,弹性模量为 2.1×10^2 GPa,纵波波速为 5×10^3 m/s,入射杆和透射杆长度为 2.8 m。为减小波的弥散,在入射杆端部粘贴直径 28 mm,厚度为 2 mm 的橡胶片作为波形整形器。为减小试样与杆件之间的摩擦力,在其两端均匀涂抹凡士林。

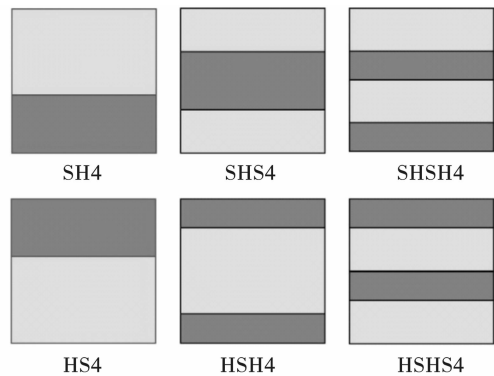


图 1 试样示意图
Fig. 1 Diagram of specimens

由于入射杆和试样的波阻抗存在差异,应力波在入射杆和试样的交界面处会发生透射和反射,通过记录应变信号,利用“三波法”获取 t 时刻试样的

应力 σ 和应变 ε ^[17]。

$$\varepsilon(t) = \frac{C_e}{L_s} \dot{O}_0 [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_e}{L_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{E_e A_e}{2 A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 、 $\varepsilon_t(t)$ 分别为 t 时刻的入射应变、反射应变及透射应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; A_e 、 C_e 、 E_e 分别为冲击杆的横截面积、纵波速度以及弹性模量; L_s 、 A_s 分别为试件的长度及截面积。



图 2 试样图
Fig. 2 Photograph of specimens

表 1 软硬岩物理力学参数表
Table 1 Parameter table of hard rock and soft rock

试样 Specimen	密度 Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压强度 Uniaxial compressive/MPa	弹性模量 Young's Modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio
硬岩 Hard rock	2454	46.17	7.62	0.18
软岩 Soft rock	2098	15.89	4.28	0.20

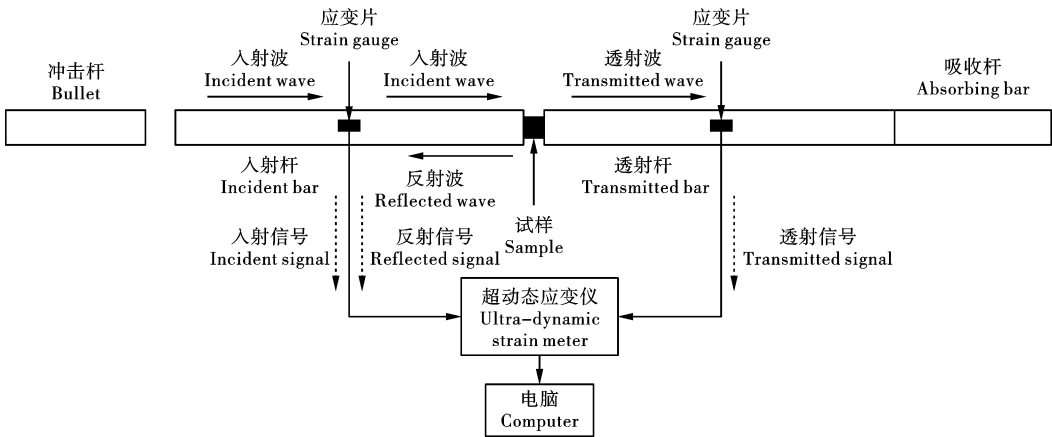


图 3 SHPB 试验系统示意图
Fig. 3 Diagram of SHPB test system

动态应力平衡试验结果如图 4、图 5 所示,入射波和反射波叠加后与透射波基本一致,说明应力平衡,试验结果可靠。通过多次预试验,选取 0.06 MPa

作为试验荷载,其破坏效果的对比性强,便于试验结果的分析。

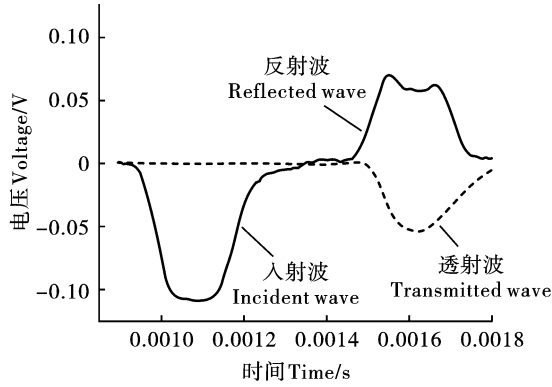


图 4 试验波形图

Fig. 4 Typical test waveform

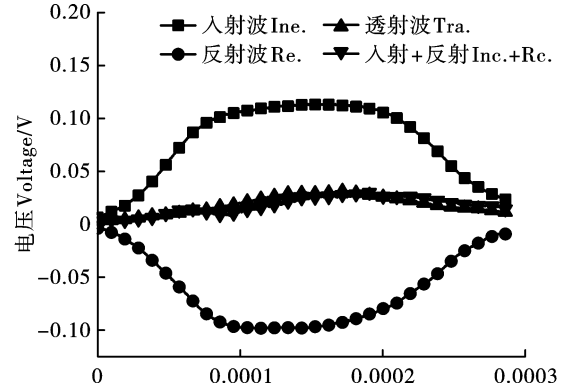


图 5 平衡验证图

Fig. 5 Balance verification diagram

2 动态力学特性

2.1 应力-应变曲线

同一冲击荷载下试样的应力应变曲线如图 6(a)

所示,硬岩峰值应力比软岩的大,而软岩峰值应变比硬岩的大,其规律与静力试验结果一致。以 HS_6 为例,试样表现为典型的岩石应力应变曲线,如图 6(c) 所示,主要分为四个阶段^[18]:

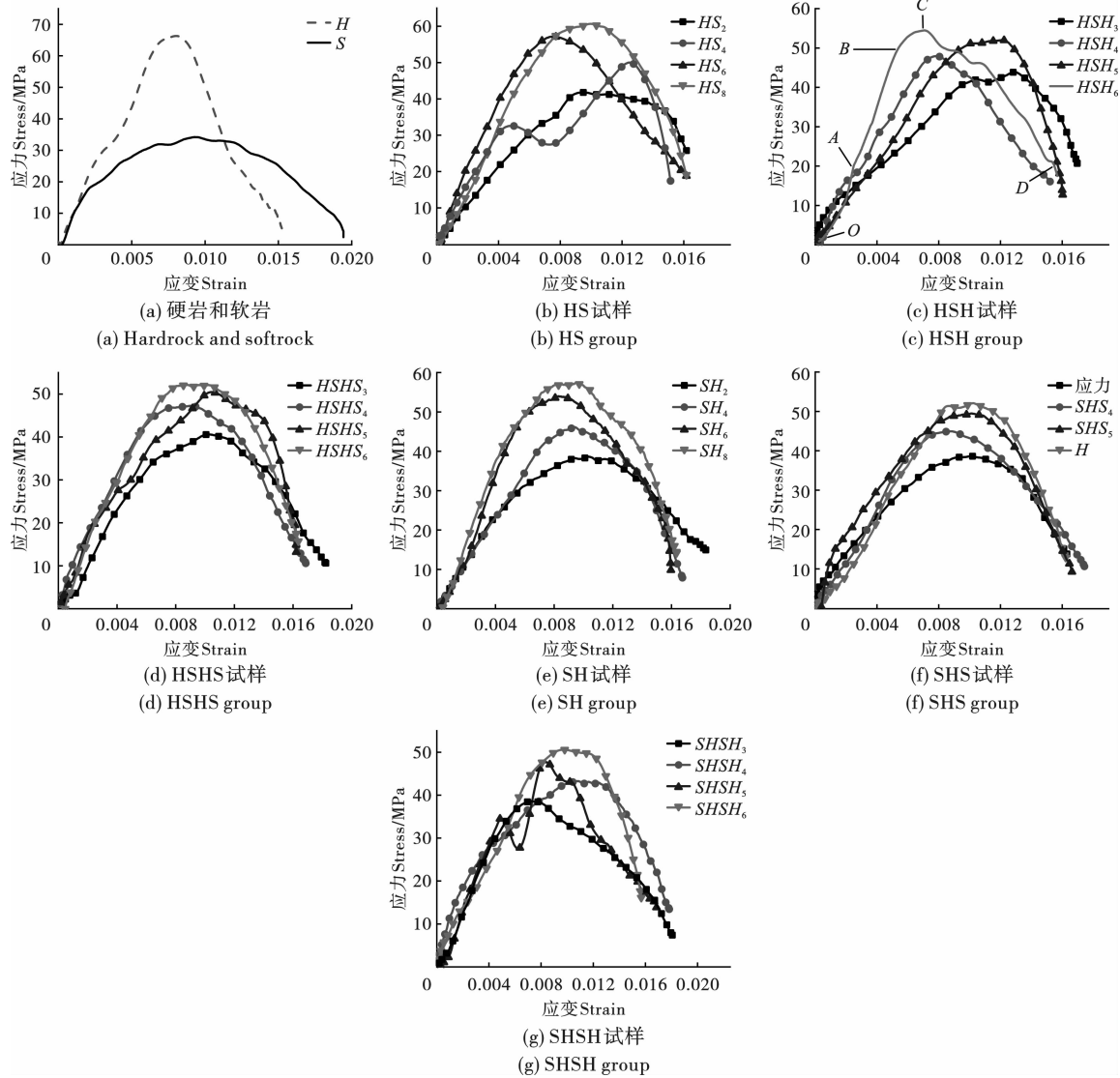


图 6 应力-应变图

Fig. 6 Stress-strain diagram

(1) *OA* 段(压实阶段),曲线斜率持续增大,应变增长速度相对应力较缓,此阶段也称为“做功硬化”。试样中的微小裂隙在压力作用下闭合,应力应变规律与完整岩石相似。

(2) *AB* 段(线弹性阶段),曲线接近直线,应变随应力增加线性增大,该阶段斜率即为试样的真实弹性模量。

(3) *BC* 段(软化阶段),曲线斜率逐渐减小至0, *C* 点应力达到峰值,应变增长速度随应力增加而加快,此阶段为非弹性变形,也即“软化”阶段,试样有新的微裂纹扩展,发生不可逆变形而不失其承载能力。

(4) *CD* 段(破坏阶段),曲线斜率为负,应力下降,应变增加,试样裂纹不断扩展和贯通,逐渐失去承载能力,发生破坏。

整体上看,试样的峰值应力随硬岩占比的增加而增大,占比低时的应力应变曲线较平缓,对应非弹性变形阶段区间大;以硬岩为主的试样,非弹性变形

持续时间短,从弹性变形快速进入破坏阶段,应力应变曲线开始下降,呈现出脆性破坏特征。

此外,试样 HS_4 、 HSH_3 、 $SHSH_5$ 的应力应变曲线上存在两个极值点,第一个极值点是由硬软岩共同弹性变形达到的,随后软岩进入下一变形阶段,硬岩处于弹性变形阶段,而出现另一个极值点。

2.2 峰值应力

各工况下峰值应力均采用3个试件的平均值进行表征,并计算其标准差与变异系数。结果表明,各组试样峰值应力的变异系数主要分布在6.2%~13.8%之间,整体离散性处于可接受范围,说明试验结果具有较好的重复性。

不同类型试样的峰值应力如图7(a)所示,互层岩样的峰值应力介于软岩和硬岩之间,随硬岩占比的增加,试样的峰值应力有明显的增加,如试样 HS_4 、 HS_6 、 HS_8 相较于试样 HS_2 的峰值应力分别增加了18.58%、35.25%、43.82%。

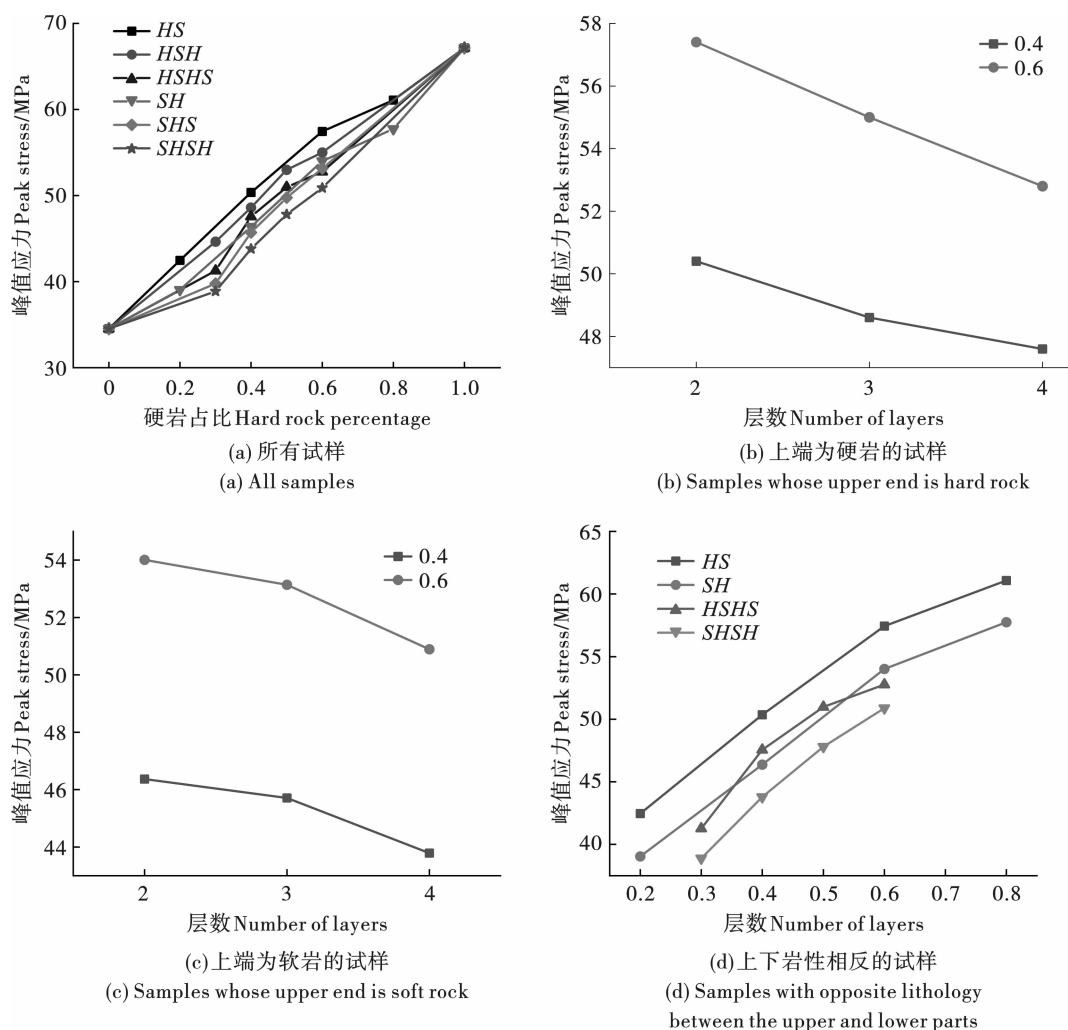


图7 峰值应力统计图

Fig. 7 Statistical plot of max stress

此外,层数也是影响试样的峰值应力的重要因素,如图7(b)~图7(d)所示。同一硬岩占比试样在同一冲击气压下,入射端为硬岩的峰值应力比软岩略大;随层数增加,峰值应力呈下降趋势,但下降的幅度比节理类型试样小^[19],如试样 HSH_6 、 $HSHS_6$ 相较 HS_6 分别减小 4.23% (2.43 MPa)、8.15% (4.68 MPa)。从波阻抗角度分析,硬岩的波阻抗比软岩大,相对入射杆较小,入射波在入射杆与试样的交界面透射较大,试样受到较大应力。

2.3 本构模型

岩体由于层理面而存在初始损伤,轴向应力主要由初始损伤、受荷损伤、层理与荷载耦合损伤及未损伤四部分承担^[20]。设 N 、 N_β 、 N_s 、 N_1 、 N_2 分别为岩体总微元数目、层理损伤微元数目、受荷损伤微元数目、层理与荷载耦合损伤微元数目、未损伤微元数目。

层理初始损伤 D_β 可定义为层理损伤微元数目 N_β 与总微元数目 N 的比值,在冲击荷载下,含层理岩体会进一步发生损伤,此时,把层理岩体受荷损伤变量定义为 D_s 。

$$D_\beta = \frac{N_\beta}{N} \quad (4)$$

$$D_s = \frac{N_s - N_1}{N - N_\beta} \quad (5)$$

整体而言,把层理岩体受荷时的总损伤变量定义为 D_t

$$D_t = \frac{N_s - N_1 + N_\beta}{N} \quad (6)$$

$$D_t = D_s + D_\beta - D_s D_\beta \quad (7)$$

根据损伤力学理论,可用岩体的宏观力学性能表征材料的劣化程度,因此可用弹性模量表示层理岩体的初始损伤 D_β

$$D_\beta = 1 - \frac{E_\beta}{E_0} \quad (8)$$

式中: E_β 为不同软硬互层岩石的复合弹性模量; E_0 为完整硬岩的弹性模量。

软硬互层试样(双层)的复合弹性模量 E_β 可近似由下式表示

$$E_\beta = \frac{(h_1 + h_2)E_1E_2}{h_2E_1 + h_1E_2} \quad (9)$$

式中: E_1 为试样第一层的弹性模量; E_2 为试样第二层的弹性模量; h_1 为试样第一层的高度, mm; h_2 为试样第二层的高度, mm。见图8。

E_β 的推导过程如下:

试样第一层的应变和变形分别为

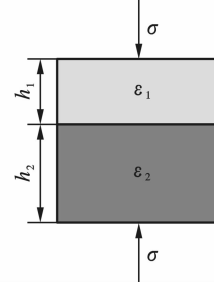


图8 试样变形示意图

Fig. 8 Schematic diagram of sample deformation

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \Delta_1 = \frac{\sigma}{E_1} h_1 \quad (10)$$

同理得,第二层的应变和变形分别为

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} \Delta_2 = \frac{\sigma}{E_2} h_2 \quad (11)$$

则试样的变形和应变分别为

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \sigma \left(\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{h_1 + h_2} = \frac{\sigma \left(\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right)}{h_1 + h_2} \quad (13)$$

最后可得试样的复合弹性模量 E_β 为

$$E_\beta = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{(h_1 + h_2)E_1E_2}{h_2E_1 + h_1E_2} \quad (14)$$

同理可得,三层、四层情况下试样的复合弹性模量分别为

$$\frac{1}{E_\beta} = \frac{\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} + \frac{h_3}{E_3}}{h_1 + h_2 + h_3} \quad (15)$$

$$\frac{1}{E_\beta} = \frac{\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} + \frac{h_3}{E_3} + \frac{h_4}{E_4}}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}$$

假定岩石微元强度 F 服从 Weibull 分布,则其概率密度函数 $P(F)$ 可以表示为^[21]

$$P(F) = m/F_0 (F/F_0)^{m-1} \exp[-(F/F_0)^m] \quad (16)$$

含层理岩体在冲击过程中,内部不断产生和发展微缺陷,微元体呈现随机破坏特征,可以用统计规律来表示,可得受荷损伤变量表达式为

$$D_s = \int_0^F P(x) dx = 1 - \exp[-(F/F_0)^m] \quad (17)$$

将公式(8)、(17)代入公式(7)中可得

$$D_t = 1 - \frac{E_\beta}{E_0} \exp[-(F/F_0)^m] \quad (18)$$

根据应变等价原理,将预制层理造成的损伤作为第一种损伤状态,层理与荷载引起的总损伤作为第二种损伤状态,则层理岩体的损伤本构关系可表

示为^[22]

$$\sigma_1 = E_0 \varepsilon_1 (1 - D_t) + \mu_\beta (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (19)$$

式中: σ_1 、 ε_1 为轴向名义应力和名义应变; σ_2 、 σ_3 为侧向名义应力; μ_β 为层理岩体的泊松比。

将式(18)代入式(19)可得

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E_\beta \exp[-(F/F_0)^m] + \mu_\beta (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (20)$$

一维应力状态下, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 式(20)转化为

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E_\beta \exp[-(F/F_0)^m] \quad (21)$$

岩石的破坏机理及破坏准则取决于 $F = f(\sigma^*)$ 表示的微元强度形式。在多种破坏准则中, 因 D-P 准则参数形式简单, 适用于岩石介质和应用广泛等特点, 采用基于 D-P 破坏准则的岩石微元强度 F ^[23]

$$F = f(\sigma^*) = \lambda(\alpha_0 I_1 + \sqrt{J_2}) \quad (22)$$

式中: λ 为动态强度增强因子, 通过冲击荷载下峰值应力与静态单轴抗压强度之比拟合获取; I_1 、 J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏量的第二不变量, 且有

$$I_1 = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* \quad (23)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2] \quad (24)$$

$$\alpha_0 = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (25)$$

$$\sigma_i^* = \sigma_i / (1 - D) \quad (26)$$

式中: φ 为岩石的内摩擦角, $^\circ$; $i = 1, 2, 3$ 。

根据广义胡克定律可得

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_\beta}(\sigma_1^* - \sigma_2^* - \sigma_3^*) \quad (27)$$

将式(26)分别代入式(23)和(24)中可得

$$I_1 = (\sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^*) / (1 - D_t) = \sigma_1 / (1 - D_t) \quad (28)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2] / (1 - D_t) \\ J_2 = \frac{1}{3}\sigma_1^2 / (1 - D_t)^2 \quad (29)$$

将式(28)、(29)代入式(22)中可得

$$F = \left(\alpha_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \frac{\lambda \sigma_1}{1 - D_t} \quad (30)$$

将式(26)代入式(27)中可得

$$\varepsilon_1 = \frac{\frac{1}{E_\beta}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{1 - D_t} = \frac{1}{E_\beta} \sigma_1 / (1 - D_t) \quad (31)$$

将式(31)代入(30)中可得

$$F = \left(\alpha_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \lambda E_\beta \varepsilon_1 \quad (32)$$

由多元函数求极值问题可知

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \left| (\sigma_{\max}, \varepsilon_m) \right| = 0 \quad (33)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为峰值应力; ε_m 为峰值应力所对应的应变。

代入式(21)可得

$$m = \left(\ln \frac{E_\beta \varepsilon_m}{\sigma_{\max}} \right)^{-1} \quad (34)$$

求得 m 之后, F_0 可以进一步通过曲线的拟合确定。基于 D-P 准则、Weibull 强度分布准则结合复合弹性模量的理论计算对本构模型进行了修正, 下面与试验所得的应力-应变曲线进行对比, 如图9所示。

从上图可知, 该本构模型可较好地表现出软硬互层试样在冲击荷载下应力-应变的变化规律。但软硬互层的力学特性相对复杂, 针对 HS_4 试样峰前阶段试验曲线与理论曲线存在一定偏差的问题, 主要原因源于层间界面的初始闭合、错动及早期局部损伤演化等细观过程, 而这些效应在等效连续介质模型中难以完全刻画, 因而在峰前阶段表现出一定误差。然而, 从峰值强度、峰后软化段及整体演化趋势来看, 理论曲线与试验结果仍保持较好的一致性, 说明所建模型在宏观层面能够合理反映软硬互层结构岩石的主要冲击力学响应特征。

3 能量耗散特征

3.1 能量计算

冲击过程中, 应力波在反射、透射的同时产生能量的传递与耗散。入射能在入射杆和试样交界面处产生反射形成反射能, 一部分传递至透射杆中形成透射能, 其余能量在传递过程中被试样吸收, 称为吸收能。其中大部分吸收能造成试样微观及宏观上的破坏, 小部分能量转化为碎块的动能、声能、热能等^[24]。

根据一维弹性波理论和能量守恒定律, 结合试验所得杆件产生的应变, 入射能 W_i 、反射能 W_r 、透射能 W_t 、吸收能 W_a 的表达式为^[25]

$$\begin{cases} W_i = AEc \int \varepsilon_i^2 dt \\ W_r = AEc \int \varepsilon_r^2 dt \\ W_t = AEc \int \varepsilon_t^2 dt \\ W_a = W_i - W_r - W_t \end{cases} \quad (35)$$

式中: A 为杆件横截面面积, mm^2 ; E 为杆件弹性模量, N/mm^2 ; c 为纵波波速, m/s ; ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为 t 时刻的入射应变、反射应变与透射应变。

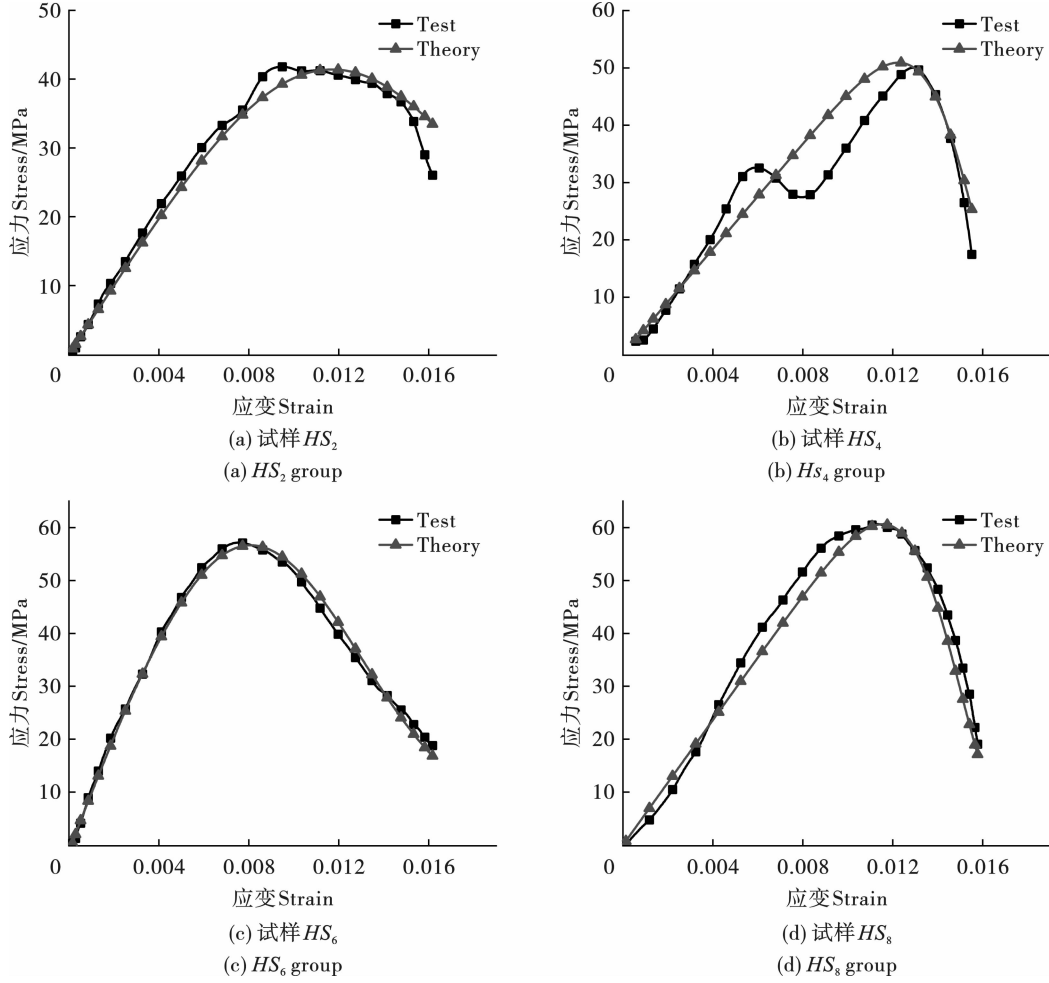


图 9 试验结果与理论值对比

Fig. 9 Comparison of experimental results with theoretical values

3.2 能量系数

为直观表现试样在冲击过程中反射能、透射能、吸收能的变化规律,采用能量反射系数 R_w 、能量透射系数 T_w 、能量吸收率 A_w 对试样进行量化研究,其表达式为

$$\begin{cases} R_w = W_r/W_i \\ T_w = W_t/W_i \\ A_w = W_a/W_i \end{cases} \quad (36)$$

通过上式获取不同试样的能量系数,每组试样做三次平行实验最终取平均值进行分析,经过计算所有平行实验变异系数 CV 均 $< 10\%$ 。如图 10 所示。以 HS 组试样为例,随硬岩占比增加,试样整体强度提高,波阻变大, R_w 近似线性下降。完整硬岩 H 的 R_w 最小,为 0.51,完整软岩 S 的 R_w 最大,为 0.79。试样 H 相较于试样 S、 HS_2 、 HS_4 、 HS_6 、 HS_8 的 R_w 分别下降了 35.7%、23.9%、16.8%、8.5% 和 5.2%。相应地,试样 HS_2 、 HS_4 、 HS_6 、 HS_8 、H 的 T_w 分别 0.18 于试样 S 分别提高了 21.5%、105.3%、

145.9%、154.7% 和 132.1%,跟硬岩占比呈正线性相关。 A_w 的变化规律与 T_w 相似,随硬岩占比增加呈线性增长,试样 HS_2 、 HS_4 、 HS_6 、 HS_8 、H 的 A_w 相较于试样 S 分别提高了 64.1%、80.0%、101.1%、112.3% 和 132.1%,说明试样强度越高,其破坏时需要吸收的能量就越高。

同一硬岩占比,端部岩性一致,不同层数时, R_w 随层数增加略增大, HS_{H4} 、 HS_{H8} 相比 HS_4 分别增加 6.6% (0.04)、10.6% (0.06),而 T_w 和 A_w 略减小,其中 T_w 分别减小 12.9% (0.009)、18.9% (0.013); A_w 分别减小 9.6% (0.03)、15.9% (0.05),如图 11 所示。结合峰值应力与层数的关系, T_w 和 A_w 的变化规律与峰值应力相同,而 R_w 的变化规律与峰值应力相反。

在冲击试验过程中,试样所受到的峰值应力与对应的能量耗散密切相关。硬岩占比和层数相同,端部为硬岩相比为软岩的试样,区别在于 R_w 较小,而 T_w 及 A_w 较大,如图 12 所示。

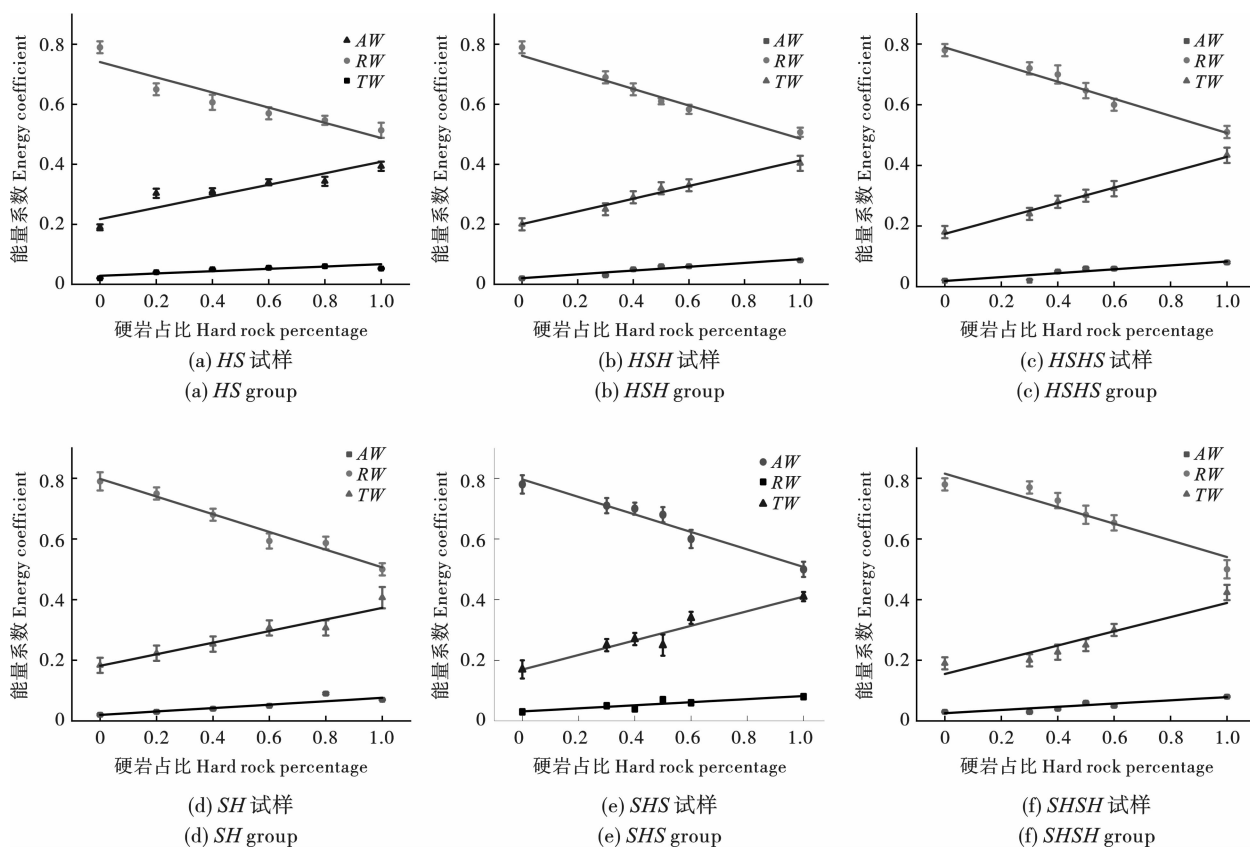


图 10 能量系数统计图

Fig. 10 Statistical plot of energy coefficient

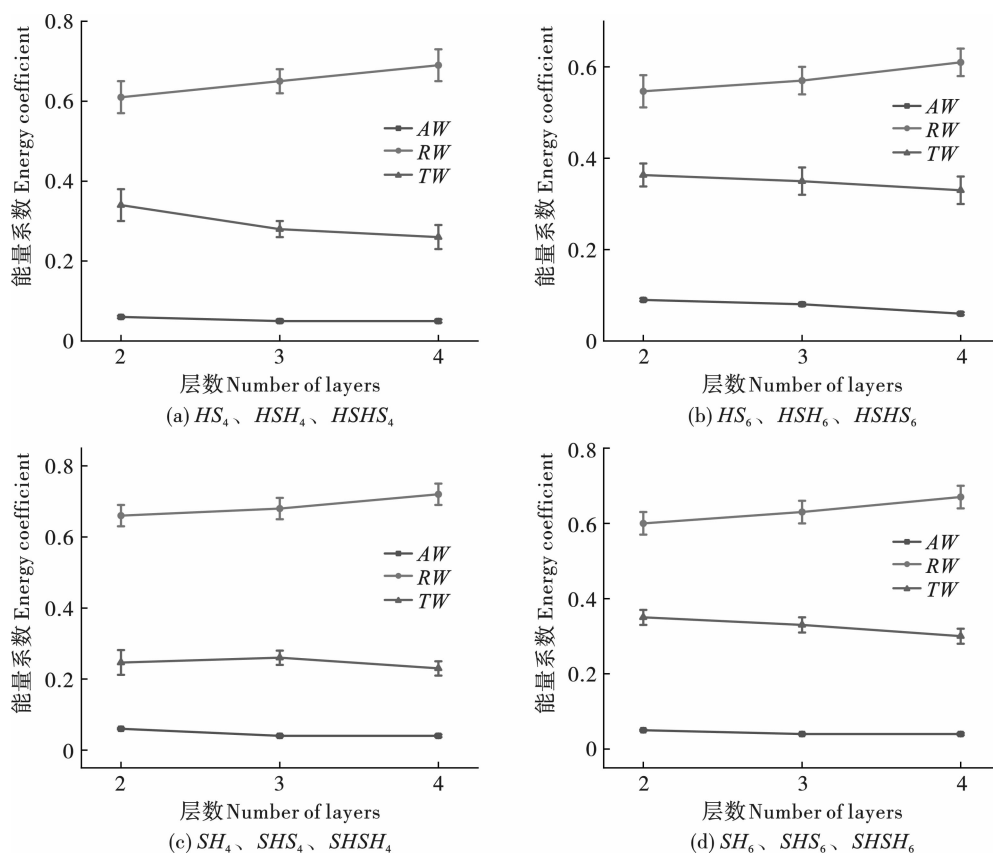


图 11 不同层数试样能量系数

Fig. 11 Energy coefficient of specimens with different layers

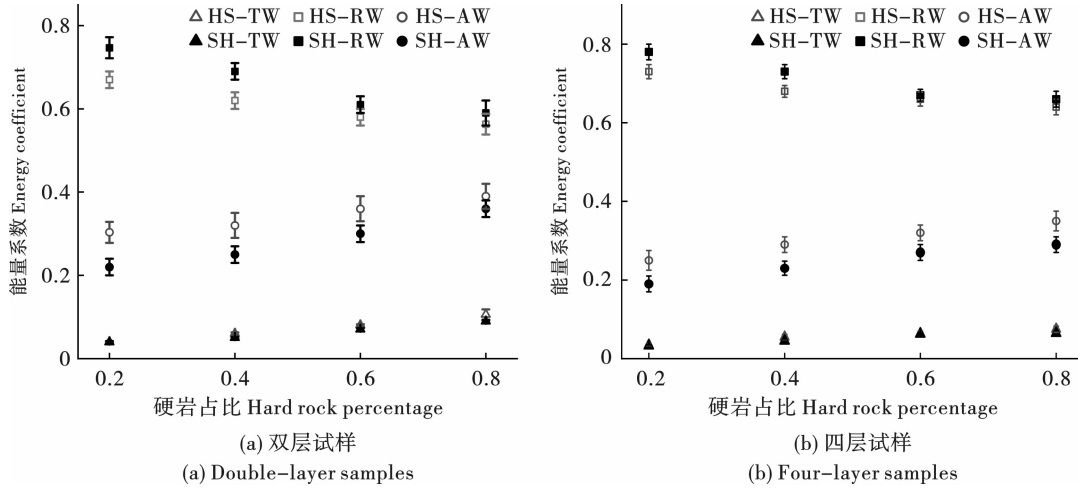


图 12 不同端部试样能量系数图

Fig. 12 Energy coefficient of upper and lower opposite specimens

4 破坏特征

不同类型试样的破坏现象汇总如表 2 所示。完整硬岩 H 及硬岩占比大于 50% 互层试样的主要破坏模式为纵向劈裂破坏, 碎块尺寸较大。冲击荷载作用下, 试样 SH_8 弹性压缩后初始裂隙闭合, 横向变形逐渐变大, 随荷载持续, 裂缝扩展贯通形成劈裂破坏, 碎块尺寸较大, 形状相对规则, 上下两平面在冲击方向存在一定残余强度。见图 13。

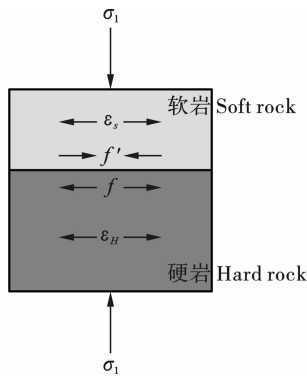


图 13 层间摩擦力示意图

Fig. 13 Diagram of interlayer friction

以软岩为主试样的破坏模式主要为多共轭斜面剪切, 碎块尺寸小、形状不规则。随硬岩占比增加, 破碎尺寸逐渐增大, 破坏程度降低; 随层数增加, 破碎尺寸减小, 破坏程度增大。对于软硬互层岩性的试样, 软岩应变 ϵ_s 大于硬岩应变 ϵ_H , 试样岩层间的摩擦力使整体强度有所降低^[26], 破坏时出现相邻岩层分离破坏, 如试样 HSH_5 、 SHS_5 所示。

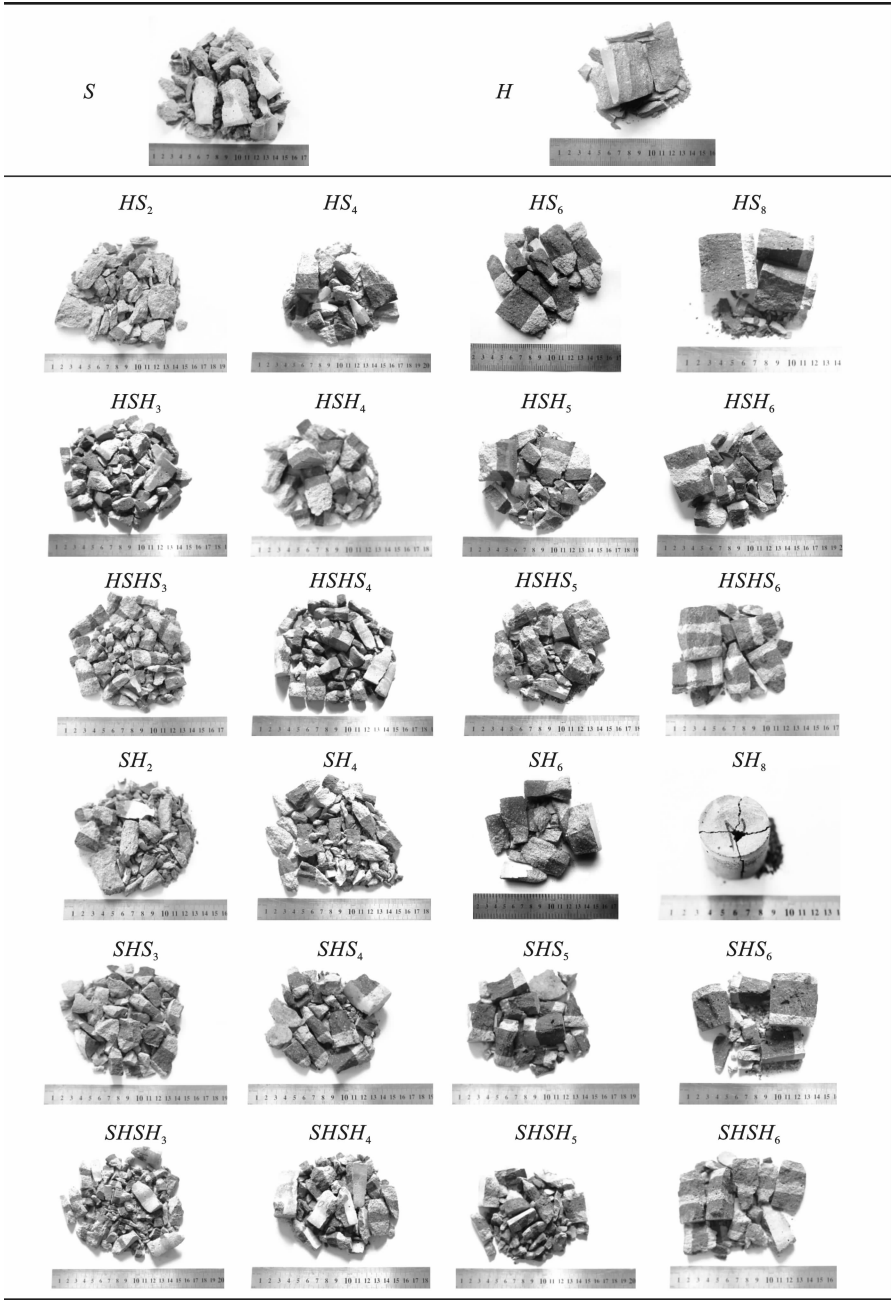
结合图 11 ~ 图 13 的能量系数变化规律及表 2 的破坏统计结果可以发现:

(1) 当 A_w 较小 (如完整硬岩 H 及高硬岩占比试样) 时, 试样主要以纵向劈裂破坏为主, 裂纹数量少、贯通裂纹清晰, 破碎块度大, 碎块尺度集中于中一大块范围。(2) 当 A_w 较大 (如软岩为主及多层互层试样) 时, 试样表现出多共轭剪切破坏与块体剥落特征, 碎块粒径显著减小, 呈现细碎化趋势。(3) 随硬岩占比增加, A_w 呈近似线性增长, 而破碎块度呈单调增大趋势; 随层数增加, 在相同岩性配比条件下, A_w 略有降低但破碎程度反而加剧, 表现为块度减小。这表明层数增加虽然削弱了单次冲击下的能量吸收能力, 但由于层间界面弱化效应和应变不协调效应, 促使裂纹在多界面处频繁起裂与反射叠加, 从而导致更为充分的碎裂。

5 结论

结合软硬互层岩体各向异性的特点, 以岩体硬岩占比、层数以岩层软硬顺序等因素, 设计了多组多种类型软硬互层的试样, 通过 $SHPB$ 冲击试验获取了试样的动力特性、破坏特征及能量耗散规律, 需要指出的是, 受试样制备工艺复杂性及冲击试验成本与效率等客观条件限制, 本文每组工况仅选取 3 个试件进行重复试验, 样本数量相对有限, 在一定程度上可能影响统计意义下结论的严格性。尽管如此, 各关键力学参数的变异系数均处于工程可接受范围内, 不同工况下试验结果变化趋势高度一致, 表明本文所得结论在规律性与机制层面仍具有较好的可靠性。后续研究将通过进一步增加样本数量并开展多因素统计分析, 以提升研究结论的普适性与稳健性, 最终得到主要的结论如下:

表 2 试样破坏情况统计表
Table 2 Statistical table of sample damage



(1)随硬岩占比增加,试样的峰值应力逐渐增大,其中软岩的峰值应力最小,硬岩的峰值应力最大,互层试样的峰值应力介于两者之间;当试样的层数增加时,其峰值应力减小;端部为硬岩相比端部为软岩的试样,其峰值应力略增大。

(2)随硬岩占比增加,能量反射系数 R_w 逐渐下降,能量透射系数 T_w 和能量吸收率 A_w 逐渐上升;随试样层数变多, R_w 逐渐上升, T_w 和 A_w 逐渐减小;端部为硬岩相比端部为软岩的试样, R_w 相对更小,而 T_w 和 A_w 相对更大。

(3)随硬岩占比增加,试样的破坏程度逐渐减小,破坏模式从以多共轭斜面剪切破坏为主逐渐转为以劈裂破坏为主;互层岩样由于存在层间摩擦力,层数增多时的破坏程度加剧。

参考文献 (References)

[1] 李地元,邱加冬,李夕兵. 冲击荷载作用下层状砂岩动态拉压力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(10):2091-2097.

[1] LI Di-yuan, QIU Jia-dong, LI Xi-bing. Experimental study on dynamic tensile and compressive properties of bedding

- sandstone under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2091-2097. (in Chinese)
- [2] YONG Ming Tien, MING Chuan Kuo. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(38): 399-412.
- [3] YONG Ming Tien, MING Chuan Kuo, CHARNG Hsein Juang. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(43): 1163-1181.
- [4] TAVALLALI A, VERVOORT A. Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions: Layer orientation and shape effects[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5): 366-377.
- [5] TAVALLALI A, VERVOORT A. Failure of layered sandstone under Brazilian test conditions: effect of micro-scale parameters on macro-scale behaviour[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(5): 641-653.
- [6] 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.
- [6] TENG Jun-yang, TANG Jian-xin, WANG Jin-bo, et al. The evolution law of the damage of bedded composite rock and its fractal characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3263-3278. (in Chinese)
- [7] LI D Y, WONG L N Y, LIU G, et al. Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression[J]. Engineering Geology, 2012, 126(13): 46-66.
- [8] 王胜伟. 软硬互层类岩石力学特性试验及本构模型研究[D]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [8] WANG Sheng-wei. Experimental study on mechanical properties and constitutive model of soft and hard interbedded rocks[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023. (in Chinese)
- [9] ZHAO Y, ZHAO G F, JIANG Y, et al. Effects of bedding on the dynamic indirect tensile strength of coal: Laboratory experiments and numerical simulation[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 132(1): 81-93.
- [10] 田栩帆, 李祥龙, 黄原明, 等. 节理倾角对深部凝灰岩动力学特性与能量传递的影响[J]. 爆破, 2024, 41(3): 43-50.
- [10] TIAN Xu-fan, LI Xiang-long, HUANG Yuan-ming, et al. Effect of joint inclination angle on dynamic properties and energy transfer of deep tuff[J]. Blasting, 2024, 41(3): 43-50. (in Chinese)
- [11] 王雁冰, 任 斌, 耿延杰, 等. 软硬介质组合岩体冲击动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12): 135-144.
- [11] WANG Yan-bing, REN Bin, GENG Yan-jie, et al. A study on impact dynamic characteristics of soft and hard medium combined rock mass[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 135-144. (in Chinese)
- [12] QIU J, LI D, LI X. Dynamic failure of a phyllite with a low degree of metamorphism under impact Brazilian test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 94: 10-17.
- [13] 李成杰, 徐 颖, 叶洲元. 冲击荷载下类煤岩组合体能量耗散与破碎特性分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 981-988.
- [13] LI Cheng-jie, XU Ying, YE Zhou-yuan. Energy dissipation and crushing characteristics of coal-rock-like combined body under impact loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 981-988. (in Chinese)
- [14] 康玉梅, 谷 今, 魏梦琦. 冲击荷载作用下软硬互层类岩石力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1062-1073.
- [14] KANG Yu-mei, GU Jin, WEI Meng-qi. Mechanical properties of soft and hard interbedded rock under impact load[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 1062-1073. (in Chinese)
- [15] 刘小亮, 陈 新, 宋笑凡. 软硬互层岩体变形破坏机制物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(S2): 3980-3995.
- [15] LIU Xiao-liang, CHEN Xin, SONG Xiao-fan. Physical simulation test on deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S2): 3980-3995. (in Chinese)
- [16] 李祥龙, 王建国, 张智宇, 等. 应变率及节理倾角对岩石模拟材料动力特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 483-490.
- [16] LI Xiang-long, WANG Jian-guo, ZHANG Zhi-yu et al. Experimental study for effects of strain rates and joint angles on dynamic responses of simulated rock materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(4): 483-490. (in Chinese)
- [17] WANG T T, SHANG B. Three-wave mutual-checking method for data processing of SHPB experiments of concrete[J]. Journal of Mechanics, 2014, 30(5): 5-10.