

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0433

基于摆锤加载岩杆 SHPB 装置的充填体 动态力学特性测试方法*

牛雷雷, 王 聪, 朱万成, 骆 柯, 仝文慧

(东北大学资源与土木工程学院采矿工程系岩石破裂与失稳研究所, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对充填体试样 SHPB(split Hopkinson pressure bar) 试验测试中存在的透射波测量的难点问题, 采用岩石长杆代替钢杆作为入射杆和透射杆的方法改进摆锤冲击加载 SHPB 试验系统, 探讨了 SHPB 试验中黏弹性波的传播及波阻抗匹配问题; 基于应力波在岩石杆件系统中的传播规律研究, 定义了应力波在入射杆和透射杆上传播的黏性衰减系数、试样-岩杆界面的透反射衰减系数; 基于 Kelvin-Voigt 模型, 利用一维波动分析程序, 得到了岩石杆件-充填体的波阻抗匹配系数与透反射衰减系数的关系; 依据现场充填体特性、波阻抗匹配系数和透反射衰减系数, 选取了四种岩石长杆改进摆锤冲击加载 SHPB 试验装置; 利用一维波动分析程序, 计算了岩杆的黏性系数、充填体和岩杆界面的应力和应变, 分析了透射波的波形特征和信噪比, 发现四种岩石与充填体波阻抗的匹配程度从好到差依次为绿砂岩、花岗岩、大理岩、玄武岩; 建立了以绿砂岩为入射杆和透射杆的摆锤冲击加载 SHPB 试验系统, 开展了充填体的动态冲击试验, 验证了试样中的应力平衡。

关键词: 波阻抗匹配; SHPB; Kelvin-Voigt 模型; 岩石杆件

中图分类号: O348.3 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Test method of dynamic mechanical properties of filling body based on pendulum-loaded rock bar SHPB device

NIU Leilei, WANG Cong, ZHU Wancheng, LUO Ke, TONG Wenhui

(Center for Rock Instability and Seismicity Research, Department of Mining Engineering, School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: In order to deal with the difficulty of measuring the transmitted wave in the backfilling SHPB (split Hopkinson pressure bar) test, rock bars are used to instead of steel bar as the incident bar and transmitted bar for improving the pendulum hammer driven SHPB system. The wave impedance matching formula and viscoelastic wave propagation in SHPB test is proposed. Based on the study of stress wave propagation in rock bar systems, the viscosity attenuation coefficients of stress wave propagation in the incident and transmitted rock bars and the reflection and transmission attenuation coefficient of the rock bar-backfilling body are defined. Based on the Kelvin-Voigt model, the effects of rock bar density and wave velocity on the transmitted wave measured of the filling body in the SHPB tests were simulated and analyzed by using a one-dimensional wave propagation analysis procedure. The relationship between the wave impedance matching coefficient and the reflection and transmission attenuation coefficient of the rock bar-backfilling body were obtained. According to the characteristics of field backfilling, the wave impedance matching coefficient and the reflection and transmission attenuation coefficient, four

* 收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2024-05-22

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2903903); 国家自然科学基金(52374081, U1906208); 黑龙江揭榜挂帅项目(2021ZXJ02A04-03)

第一作者: 牛雷雷(1987—), 男, 博士, 副教授, niuleilei@mail.neu.edu.cn

通信作者: 朱万成(1974—), 男, 博士, 教授, zhuwancheng@mail.neu.edu.cn

long rock bars were selected to modify the pendulum hammer driven SHPB system. The viscosity coefficient of the rock bar was measured and stresses and strains on the interfaces of rock bar and backfilling body were calculated by using the one-dimensional wave propagation analysis procedure. The stress waveform characteristics and signal-to-noise ratio of the transmitted waves were analyzed. The matching degree of four kinds of rock bars and backfilling wave impedance from good to poor is obtained, which is green sandstone, granite, marble and basalt. The dynamic impacting experiment on the filling body was conducted and the stress balance in the sample was verified. The pendulum hammer driven SHPB system with green sandstone incident bar and transmission bar is established, which provides support for the dynamic mechanical characteristics of the backfilling.

Keywords: wave impedance matching; SHPB; Kelvin-Voigt model; rock bars

充填采矿法由于可以控制采场地压,充分利用采矿废弃物,防止地表沉陷,实现矿山绿色、安全和高效开采^[1-2],因而在矿山开采中被广泛采用。充填后的采场由于受到周边爆破开采的频繁扰动会影响充填体的稳定,因此,需要研究动态扰动下充填体的力学特性。但是,传统 SHPB(split Hopkinson pressure bar) 试验系统使用金属材料作为入射杆和透射杆件,而充填体作为胶凝材料,波阻抗较小,与金属杆件的波阻抗相差较大,其波阻抗值不到金属杆件的 1/10,导致透射杆的输出电压信号较低,在噪声信号的干扰下,难以精确测得透射波形,影响动态强度的计算。

在 SHPB 试验中,应力波在试样和入射杆、透射杆的界面传播时,透射与反射比取决于介质之间的波阻抗^[3]。因此,在使用 SHPB 系统开展试验时,研究不同介质之间的波阻抗匹配^[4]问题尤为关键。杨小林^[5]用不同配比的水泥砂浆进行了 5 组不同波阻抗匹配试验,得到炸药与试样的最优配比在 1.60~1.65 之间。刘希灵等^[6]通过断铅试验,对应力波在花岗岩、大理石、红砂岩和灰岩等介质中传播的衰减特性进行了研究,发现波阻抗很好地反映岩石对动量传递的阻力,波阻抗越大,应力波传播的衰减越大。杨仁树等^[7-8]利用 SHPB 试验系统对不同波阻抗系列的材料进行了冲击测试,对比分析了杆件与试样的波阻抗值对岩石动态抗拉强度、敏感系数的影响规律,波阻抗越小,反射波幅值越大,透射波幅值越小。

由于岩石中含有微孔隙和微裂纹等天然缺陷,应力波在岩石中传播会产生幅值的衰减和波形的弥散,需要考虑岩杆中应力波传播衰减对测试结果的影响。魏修成等^[9]通过数值模拟得到了频率变化的衰减规律,提出了横向各项同性多孔介质模型。王观石等^[10]结合 Kelvin-Voigt 模型探究了含结构面岩体中应力波振幅与空间及时间的关系。Li 等^[11-12]利用两根花岗岩圆杆作入射杆和透射杆,模拟研究了节理对应力波传播的影响。牛雷雷等^[13-14]基于 Kelvin-Voigt 模型研究了应力波在长岩杆中的传播衰减特性。王梦等^[15]总结了天然岩石材料的细观缺陷和宏观节理导致应力波衰减的作用机理及规律。

综上所述,虽然已有学者利用岩杆作为入射杆和透射杆开展应力波传播特性等相关研究,但是在对充填体力学特性的测试方面,仍存在透射波幅值较小、不易测量的问题。因此,本文中针对充填体与传统 SHPB 试验中入射杆和透射杆波阻抗相差较大导致的透射波难以测量的问题开展研究,提出 SHPB 试验中波阻抗匹配公式,分析应力波在岩石和充填体界面的透反射规律,选定岩杆,建立改进的摆锤冲击加载 SHPB 试验系统,为充填体的动态力学特性测试提供试验条件。

1 基于 SHPB 试验的波阻抗匹配

1.1 摆锤冲击加载 SHPB 试验装置

摆锤冲击加载 SHPB 试验系统由加载装置、杆件系统和数据采集与记录系统组成,如图 1 所示。加载装置是利用摆锤冲击入射杆产生加载波形,杆件系统包括入射杆、透射杆、夹在两个杆之间的样品、缓冲装置及支架,数据采集与记录系统包括应变片、动态应变仪、DL850 示波记录仪和计算机。入射杆件、透射杆件长度均为 2 m,直径为 50 mm。

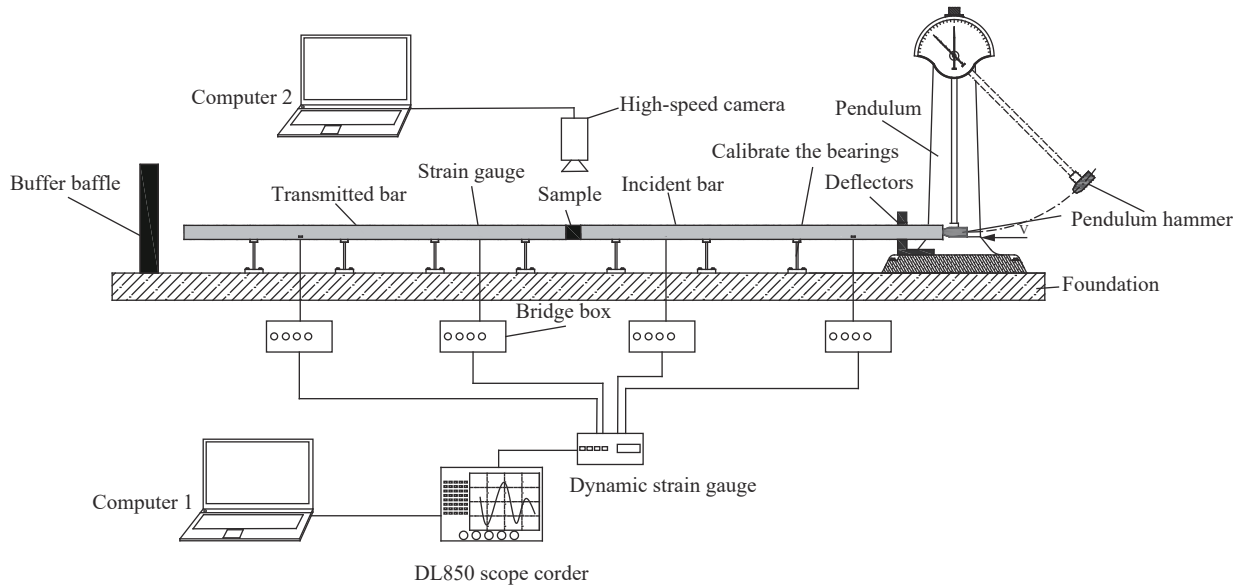


图 1 摆锤冲击加载 SHPB 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of pendulum hammer driven SHPB system

1.2 SHPB 试验中的波阻抗匹配

如图 2 所示, 在 SHPB 试验中, 应力波从激发传播到透射杆, 依次经历了摆锤-入射杆、入射杆-试件、试件-透射杆三个界面, 分别对应 A-A、B-B、C-C 界面, 应力波应变值在三个界面处分别为 ε_A 、 ε_B 、 ε_C , 试样在 B-B 和 C-C 界面的受力分别为 F_1 和 F_2 。

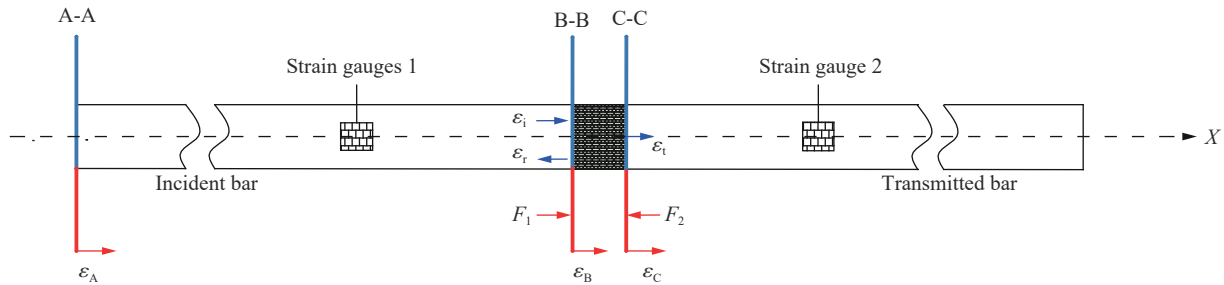


图 2 应力波在杆件系统中传播

Fig. 2 Stress wave propagation in the bars

常规 SHPB 试验装置采用钢杆作为入射杆和透射杆, 应力波在一维钢杆中近似不产生衰减, 为实现入射杆、透射杆和充填体试样的波阻抗匹配, 本文中采用岩石杆代替常规 SHPB 试验中的钢杆。应力波从 A-A 界面传播到 C-C 界面的过程中经历了两种形式的衰减, 第一种衰减是应力波从 A-A 界面传播到 B-B 界面的过程中, 受到岩石黏性的影响导致应力波出现衰减, 应力波的衰减会随着传播距离的增大而增大; 第二种衰减是应力波从 B-B 界面透射到 C-C 界面时, 由于充填体试样与岩杆的波阻抗差异, 应力波在传播至两种不同波阻抗介质界面时会发生明显的透反射, 且透反射系数受两种介质波阻抗比值的影响。波阻抗 $Z_i = \rho c$ ^[16], 其中 ρ 为介质的密度, c 为应力波在介质中的传播速度。

假设一个初始应力波的应变值为 ε_A , 从 A-A 界面传播到 B-B 界面处, 应力波应变值变为 ε_B , 从 B-B 界面透射到 C-C 界面时, 应力波应变值变为 ε_C , 此处忽略充填体与岩石杆件之间的摩擦效应。在入射杆和透射杆上分别粘贴有一组应变片, 测得的应变分别为 ε_1 和 ε_2 , 测得的电压分别为 U_1 和 U_2 , 从 C-C 界面传播到测点 2 的黏性衰减系数为 γ , 则:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_A} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_C}{\varepsilon_B} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_C} \quad (3)$$

$$\varepsilon_C = \varepsilon_A \alpha \beta \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_A \alpha \beta \gamma \quad (5)$$

式中: α 为入射杆黏性衰减系数, β 为透反射衰减系数。

在 SHPB 试验中, 试样的动态强度大于静态强度, 透射波的应力应大于试样的静态强度 σ_c , 同时, 在透射杆上测点的应变 ε_2 大于应变片的最小测量应变 ε_m , 保证能够测试到透射波形, 即:

$$f(\varepsilon = \varepsilon_A \alpha \beta) > \sigma_c \quad (6)$$

$$\varepsilon_A > \frac{\varepsilon_m}{\alpha \beta \gamma} \quad (7)$$

式中: f 为岩杆的应力与应变的函数^[17]。

2 改进的摆锤冲击加载 SHPB 试验模型

2.1 应力波在长岩杆上的衰减模型

应力波在岩杆中传播会产生衰减现象可以用岩石的黏性来表征, 本文中利用 Kelvin-Voigt 模型表达岩石的黏性衰减, 如图 3 所示, 该模型能够简单有效地表征黏性介质对应力波衰减的影响^[18-19], 其本构方程为:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (8)$$

式中: E 为模型中弹簧的弹性模量, η 为模型中牛顿体的黏性系数。

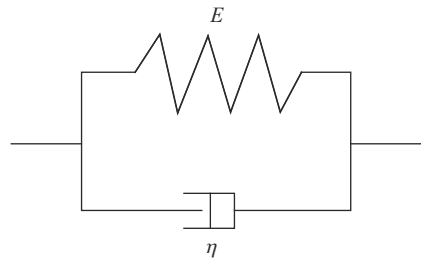


图 3 Kelvin-Voigt 模型

Fig. 3 Kelvin-Voigt model

基于开尔文体的本构方程和一维纵波的连续性方程和运动方程, 可以求得一维黏弹性波的控制方程:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (9)$$

设岩杆冲击端距离监测点的距离为 x , 则:

$$u(x, t) = u_0 \exp[i(\omega_1 t - k_1 x)] \quad (10)$$

式中: u_0 为幅值, ω_1 为角频率, k_1 为应力波在岩石中的响应波数。

将式 (10) 代入式 (9), 得到:

$$u(x, t) = u_0 \exp(\alpha_x x) \exp[i(\omega_1 t - kx)] \quad (11)$$

式中:

$$k^2 = \frac{\rho E \omega_1^2}{2(E^2 + \eta^2 \omega_1^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta^2 \omega_1^2}{E^2}} + 1 \right) \quad (12)$$

$$\alpha_x^2 = \frac{\rho E \omega_1^2}{2(E^2 + \eta^2 \omega_1^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta^2 \omega_1^2}{E^2}} - 1 \right) \quad (13)$$

可见, α_x 为应力波随传播距离 x 增加的衰减因子。由于 ε_0 取值为初始应力波的应变值, 因此:

$$u(x, t) = \varepsilon_0 \exp(\alpha_x x) \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (1), 得到:

$$\alpha = \exp(\alpha_x x) \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (6)~(7), 得到:

$$f \left(\varepsilon = \varepsilon_A \exp \left[x \sqrt{\frac{\rho E \omega_1^2}{2(E^2 + \eta^2 \omega_1^2)}} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta^2 \omega_1^2}{E^2}} - 1 \right) \right] \beta \right) > \sigma_c \quad (16)$$

$$\varepsilon_A > \frac{\varepsilon_m}{\exp \left[x \sqrt{\frac{\rho E \omega_1^2}{2(E^2 + \eta^2 \omega_1^2)}} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta^2 \omega_1^2}{E^2}} - 1 \right) \right] \beta \gamma} \quad (17)$$

2.2 应力波在岩石和充填体界面的透反射规律

2.2.1 充填体试样制备

试验中所用的胶凝材料是新城金矿研制的山金 SC2020-C, 充填体的骨料则来源于新城金矿的全尾砂, 充填体配比参数如表 1 所示。冲击试验选用尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm 的试样, 而静态加载试验选用 $\varnothing 50$ mm×100 mm 的试样。实验前将全尾砂烘干, 然后用隔筛过滤去除粗大的石子和异物。在模具内壁涂抹润滑油, 以便于脱模。按照表 1 的配比, 将山金 SC2020-C、全尾砂和水进行充分搅拌, 使其混合均匀。将搅拌均匀的充填体倒入模具内, 然后放入养护箱中, 在温度 20 ℃、湿度 98% 的养护箱中养护 28 d, 养护结束后进行波阻抗和力学性能测试。

采用波速测试仪测量充填体的纵波波速; 用电子秤称取充填体的质量, 求得密度; 通过微机控制电液伺服压力机测得充填体的静态抗压强度和弹性模量。充填体的基本物理力学参数如表 2 所示。

表 1 充填体的配比

Table 1 Material proportion of backfilling			
充填体 骨料	胶凝 材料	灰砂比	固体 含量/%
新城金矿的全尾砂	山金 SC2020-C	1 : 15	72

表 2 充填体的基本物理力学参数

Table 2 Basic mechanical parameters of backfilling				
密度/ (g·cm ⁻³)	波速/ (m·s ⁻¹)	波阻抗/ (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa
1.86	1989.8	3.7×10 ⁶	0.6	3.05

2.2.2 岩石和充填体界面的透反射

应力波在两种介质中传播时, 透射与反射比取决于介质之间的波阻抗^[16]。引入波阻抗匹配系数 K 表征两种介质之间的波阻抗比值, 根据岩石与充填体的基本特性, 可知 K 应满足 $K > 1$ 。

$$K = \frac{Z_p}{Z_r}$$

式中: Z_p 为岩石杆件的波阻抗。依据文献 [7, 16] 得到岩石的密度、弹性模量和波速参数。具体岩石杆参数选取及模拟结果见表 3。初始入射波选用摆锤最大冲击速度 (4.85 m/s) 撞击入射杆产生的应力波, 确保充填体能在最大应力波作用下被破坏, 进而求得岩石和充填体的最大波阻抗匹配值。基于 2.1 节提到的应力波在一维黏弹性杆中的传播理论、透反射理论和黏弹性损伤理论, 编制一维黏弹性应力波分析程序^[13-14], 程序分为前处理、应力分析和后处理三个模块, 通过对节点进行应力计算和损伤判断, 计算关键的应力、应变和黏性系数等信息。利用该程序模拟分析了 SHPB 系统中岩石杆的密度和波速对充填体动态试验结果的影响, 得到岩杆和充填体界面的透反射衰减系数 β 与波阻抗匹配系数 K 的关系。如图 4 所示, 基于波阻抗差异的衰减系数 β 随波阻抗匹配系数的增大呈现减小的趋势, 其拟合公式为 $\beta = -0.0727K + 0.545$, $R^2 = 0.975$ 。代入式 (16) 得到:

$$f(\varepsilon = \varepsilon_A \exp \left[x \sqrt{\frac{\rho E \omega_1^2}{2(E^2 + \eta^2 \omega_1^2)} \left(\sqrt{1 + \frac{\eta^2 \omega_1^2}{E^2}} - 1 \right)} \right] (-0.0727K + 0.545)) > \sigma_c \quad (18)$$

表 3 岩石杆的参数及模拟结果

Table 3 Parameters of the rock bars and simulation results

材料	初始入射电压/mV	岩石密度/ (g·cm ⁻³)	岩石波速/ (m·s ⁻¹)	岩石杆波阻抗/ (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	充填体波阻抗/ (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	U ₁ / mV	U ₂ / mV	波阻抗匹配 系数K	透反射衰减 系数β/%
绿砂岩	9.10	2.470	3399.0	5.38×10 ⁶	3.7×10 ⁶	5.90	2.736	1.45	46.38
黄砂岩 ^[16]		2.182	2467.0	5.86×10 ⁶		6.09	2.620	1.58	43.02
花岗岩-I ^[16]		2.561	2981.0	7.63×10 ⁶		6.31	2.372	2.06	37.59
玄武岩		2.979	5988.0	8.40×10 ⁶		6.42	2.326	2.27	36.23
灰砂岩 ^[7]		2.571	3907.0	1.00×10 ⁷		6.51	2.305	2.71	35.40
红砂岩 ^[16]		2.383	2457.0	1.16×10 ⁷		6.55	2.163	3.14	33.03
花岗岩-II ^[16]		2.627	4425.0	1.24×10 ⁷		6.72	1.995	3.34	29.69
花岗岩-III		2.880	4291.0	1.39×10 ⁷		6.85	1.895	3.75	27.67
玄武岩 ^[16]		2.828	6360.0	1.43×10 ⁷		6.79	1.705	3.85	25.11
石灰岩 ^[16]		2.716	6772.0	1.78×10 ⁷		7.40	1.549	4.82	20.93
大理岩		2.920	4754.5	1.80×10 ⁷		7.32	1.450	4.86	19.81
花岗岩-IV ^[7]		2.632	5415.0	1.84×10 ⁷		7.30	1.265	4.97	17.33

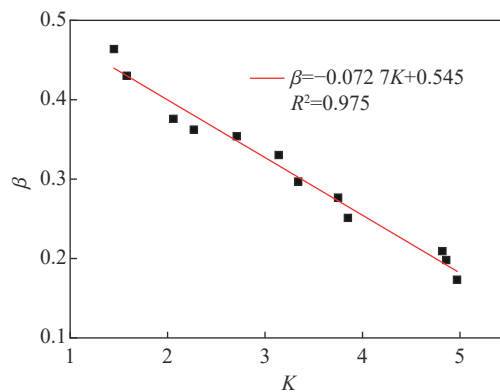


图 4 波阻抗匹配系数 K 与透反射衰减系数 β 的关系

Fig. 4 Relationship between wave impedance matching coefficient K and transmission attenuation coefficient β

3 四种岩杆-充填体组合的动态抗压试验

3.1 选取岩杆

为了与现场充填体配方制作的试样波阻抗相匹配,选取了四种岩石:绿砂岩、花岗岩、大理岩和玄武岩制作长岩杆改进 SHPB 试验装置。绿砂岩产于四川地区,花岗岩产于北京地区,大理岩和玄武岩产于云南地区。将完整性和均质性较好的四种岩石切割,加工成 50 mm×50 mm×1 000 mm 的长方体岩杆。将绿砂岩、花岗岩、大理岩和玄武岩长岩杆标记为材料 I、II、III 和 IV。

采用波速测试仪测量四种岩杆和充填体的纵波波速;通过微机控制电液伺服压力机测得充填体的静态抗压强度;用电子秤称取四种岩杆的质量,求得密度;四种岩杆的基本物理力学参数见表 4。

表 4 岩石基本力学参数

Table 4 Basic mechanical parameters of the rock

材料	密度/(g·cm ⁻³)	波速/(m·s ⁻¹)	波阻抗/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
绿砂岩	2.47	3399.17	8.396×10 ⁶	29.8	2.40	8.4
花岗岩	2.88	4290.93	1.236×10 ⁷	87.6	6.82	26.3
大理岩	2.92	4754.50	1.388×10 ⁶	98.5	8.12	30.0
玄武岩	2.98	5988.33	1.785×10 ⁶	182.5	15.23	49.4

3.2 改进的摆锤冲击加载 SHPB 试验装置

基于 SHPB 试验中波阻抗匹配原则, 选取岩杆替代常规 SHPB 试验中的钢杆作为入射杆和透射杆, 建立如图 5 所示的改进的 SHPB 试验装置。依据惠斯通电桥全桥原理将电阻应变片粘贴在岩杆上, 每根杆粘贴两组, 杆长为 1 m, 两组应变片分别粘贴在距离加载端 250 和 750 mm 处, 如图 6 所示。将应变片连接好的引出线与桥盒连接, 同时将地线也连接在桥盒上, 保证试验过程中无其他信号的干扰。岩杆放置在带有支座的 SHPB 试验系统的中间位置, 使冲击入射杆、透射杆保持在一条直线上。使用桥盒连接岩石杆件与动态应变仪, 示波器与动态应变仪连接, 用网线将示波器与计算机进行连接。

由于岩石杆件是黏弹性介质, 在处理测点应力波数据时应结合一维黏弹性波传播特征, 即应力波在黏弹性介质中传播时表现出幅值衰减和能量耗散特性。首先, 利用改进的摆锤冲击加载 SHPB 试验装置进行不含试样的冲击试验, 测试入射杆和透射杆上的应力波形, 结合一维黏弹性应力波分析程序, 把入射杆上测得的波形作为输入波形, 透射杆上的波形作为输出波形, 通过试错的方法测得岩石长杆的黏性系数, 详细方法参见文献 [13]。然后利用摆锤冲击加载 SHPB 试验装置进行充填体的冲击试验, 测出入射杆和透射杆上的应力波形, 结合一维黏弹性应力波分析程序、黏性系数推算出充填体和岩杆界面(B-B、C-C)处应力波形。依据惠斯通全桥电压信号转换应变信号求得试样的 $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_t(t)$, 然后依据二波法^[17] 计算出试样的应力、应变和应变率:

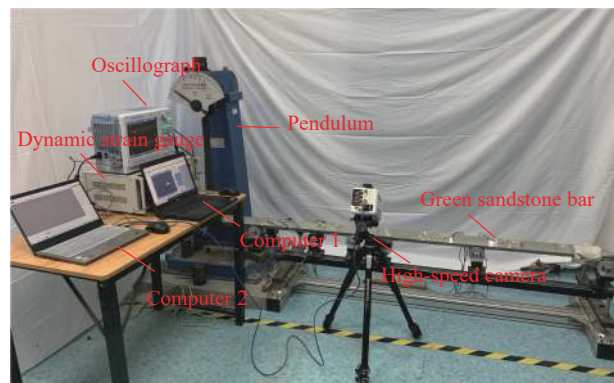


图 5 改进的摆锤冲击加载 SHPB 试验系统

Fig. 5 Modified pendulum hammer driven SHPB system



图 6 岩石杆件

Fig. 6 Rock bars

$$\varepsilon = \frac{2e}{(1+\mu)e_0K_s} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{A}{A_s} E \varepsilon_t \\ \varepsilon(t) = -\frac{2c}{l_s} \int_0^t \varepsilon_t(t) dt \\ \dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c}{l_s} \varepsilon_t(t) \end{cases} \quad (20)$$

式中: e 为输出电压, e_0 为输入电压即桥盒电压, K_s 为应变片的灵敏度系数 ($K_s=2\sim 2.2$), μ 为泊松比, $\sigma(t)$ 为平均应力, $\varepsilon(t)$ 为平均应变, $\dot{\varepsilon}(t)$ 为平均应变率, A 为岩杆横截面积, A_s 为充填体试样的横截面积, $\varepsilon_t(t)$ 为透射应变, $\varepsilon_r(t)$ 为反射应变, E 为弹性模量, c 为波速, l_s 为充填体试样在加载方向的长度。

3.3 波形分析

基于建立的改进的摆锤冲击加载 SHPB 试验装置, 开展了冲击试验, 分析了波阻抗匹配对透射波测试的影响规律。本节对在相近加载速度 (2.57 m/s) 作用下四种岩石杆件-充填体组合的入射波与透射波的波形进行对比分析, 如图 7 所示。表 5 为四种岩石杆件-充填体组合的动态力学参数。

由图 7 和表 5 可知, 在相同摆锤冲击速度下, 钢杆透射波数值难以检测到, 由于钢杆与充填体波阻抗相差较大, 导致入射波基本上都反射为反射波, 透射波趋近于零。不同岩石杆件的入射波波形相似, 透射波与入射波峰值的比值由大到小依次为: 绿砂岩、花岗岩、大理岩、玄武岩。

在相同的撞击速度下, 反射波和透射波波形与岩石杆件和充填体的波阻抗匹配情况有一定的相关性。由于充填体的波阻抗小于岩杆的波阻抗, 因此岩杆的波阻抗值越小, 岩杆的波阻抗与充填体的波阻抗越接近, 波阻抗匹配系数越小, 岩杆与充填体的波阻抗越匹配, 反射到入射杆中的应力波越少, 透射到透射杆中的应力波越多, 越利于透射波的检测。透射波的能量越大, 表明作用在充填体上的能量越多, 越容易测得不同应变率下充填体的动态强度, 同时也有利于揭示充填体的应变率效应。

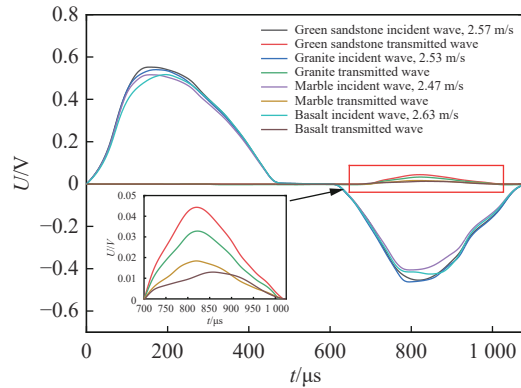


图 7 相同冲击速度下的波形对比

Fig. 7 Waveform comparison at similar impact velocity

表 5 四种岩石杆件-充填体组合的动态力学参数

Table 5 Dynamic mechanical parameters of four rock bar-backfilling

岩杆种类	黏性系数/ (MPa·s)	摆锤加载速度/ (m·s ⁻¹)	应变率/s ⁻¹	波阻抗匹配 系数K	波阻抗/ (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	电压幅值/V			透射波峰值/ 入射波峰值
						入射	反射	透射	
绿砂岩	1.00	2.57	47.95	2.269	8.396×10 ⁶	0.553	0.507	0.045	0.16
花岗岩	0.60		46.67	3.340	1.236×10 ⁷	0.541	0.474	0.033	0.13
大理岩	0.50		45.55	3.752	1.388×10 ⁶	0.525	0.436	0.019	0.11
玄武岩	0.30		48.76	4.823	1.785×10 ⁶	0.520	0.436	0.013	0.10
钢杆	0		46.69			0.634	0.619	0	0

在数据采集的过程中, 除了岩杆和充填体试样上传播的应力波产生的电信号, 周边环境也会产生一些噪音信号, 这些噪音信号会对入射波、反射波和透射波的信号采集造成干扰。尤其是入射杆、透射杆与充填体波阻抗相差较大时, 透射波的信号较弱, 透射波有可能与环境中的噪声信号相似, 难以分离出来。因此, 要精准地检测到应力波产生的电信号, 需要确保噪声远小于有效信号。信噪比是衡量数据是否失真的主要指标。

利用示波器采集到应力波数据, 读取透射波的最大信号电压 U_s , 噪声电压 U_n 。通过对比四种岩石杆件-充填体组合的信噪比, 得到岩石与充填体波阻抗匹配情况, 如图 8 所示。信噪比的具体计算公式如下^[20]:

$$R_{sn} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} = 20 \lg \frac{U_s}{U_n}$$

式中: R_{sn} 为信噪比, dB; P_s 为信号的有效功率, W; P_n 为噪声的有效功率, W; U_s 为信号的电压, V; U_n 为噪声的电压, V。

由图 8 可知, 在相同情况下, 随着应变率的变化, 绿砂岩杆-充填体的信噪比在 35~40 dB 范围内, 花岗岩的信噪比在 33~37 dB 范围内, 大理岩的信噪比在 27~33 dB 范围内(岩杆在冲击过程中发生断裂), 玄武岩的信噪比值 26~31 dB 范围内。信噪比与应变率的关系见表 6, 从表中可以看出, 随着应变率的增大, 信噪比随之变大, 这主要是因为应变率的增大导致透射波信号电压峰值变大, 而噪声电压基本不变, 表现为透射波信噪比随着应变率的增大而增大。在相同加载应力波和噪音环境下, 信噪比由大到小依次为: 绿砂岩、花岗岩、大理岩、玄武岩, 这是因为, 波阻抗匹配系数 K 越大, 透反射衰减系数越小, 透射杆上的应变越小, 在噪声不变的条件下, 信噪比减小。因此, 在这四种岩杆中, 最终选择绿砂岩杆作为入射杆和透射杆替代常规 SHPB 试验中的钢杆, 开展充填体的动态力学试验。

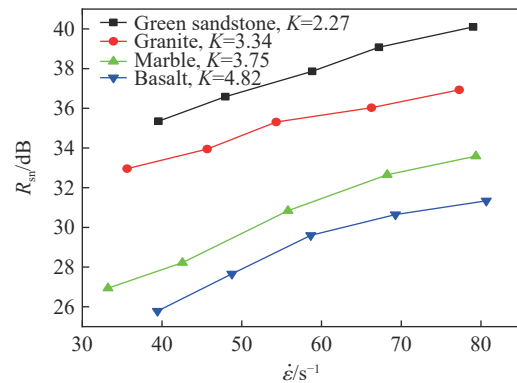


图 8 四种岩杆-充填体的信噪比与应变率的关系
Fig. 8 Relationship between signal-to-noise ratio and strain rate of four rock bar-backfilling

表 6 信噪比与应变率的关系

Table 6 Relationship between signal-to-noise ratio and strain rate

岩石杆件	应变率/s ⁻¹	信号电压/V	噪音电压/ μ V	R_{sn} /dB
绿砂岩	39.56	0.040	683	35.35
	47.95	0.045	667	36.59
	58.83	0.051	652	37.86
	67.21	0.060	663	39.08
	79.02	0.068	669	40.10
花岗岩	35.62	0.029	646	32.96
	45.66	0.033	667	33.90
	54.32	0.038	652	35.31
	66.27	0.042	663	36.03
	77.27	0.047	669	36.93
大理岩	33.22	0.015	652	26.94
	42.55	0.017	663	28.23
	55.79	0.023	667	30.84
	68.23	0.028	652	32.65
玄武岩	79.36	0.032	669	33.59
	39.43	0.013	683	25.78
	48.76	0.016	667	27.66
	58.65	0.020	652	29.60
	69.27	0.023	663	30.65
80.67	0.025	669	31.34	

3.4 充填体试样中的力平衡

SHPB 试验的一个基本假设是应力波在试样中往返传播几次后应力近似均匀, 本节中利用绿砂岩长

杆作为入射杆和透射杆改进摆锤冲击加载 SHPB 试验装置, 开展 SHPB 试验, 依据测得的人射波、反射波和透射波, 验证充填体试样中的应力平衡。如图 9(a) 所示, 利用粘贴在入射杆上的应变片测得入射波和反射波, 利用粘贴在透射杆上的应变片测得透射波, 由于充填体试样的波阻抗比岩杆的波阻抗小, 绿砂岩与充填体存在波阻抗差, 应力波从入射岩杆传播到充填体时, 波阻抗由大变小, 从充填体传播至透射岩杆时, 波阻抗由小到大, 表现在波形图上就是入射波与反射波方向相反, 波形相近, 幅值相差较小, 透射波幅值较小。如图 9(b) 所示, 根据应力均匀性假设和一维平衡假设, 将入射波和反射波叠加, 并与透射波进行比较, 叠加波与透射波的幅值及波形近似相同, 说明利用改进的摆锤冲击加载 SHPB 试验系统开展的充填体 SHPB 试验, 试样两端的应力可以达到平衡^[21], 符合 SHPB 试验的基本假设。

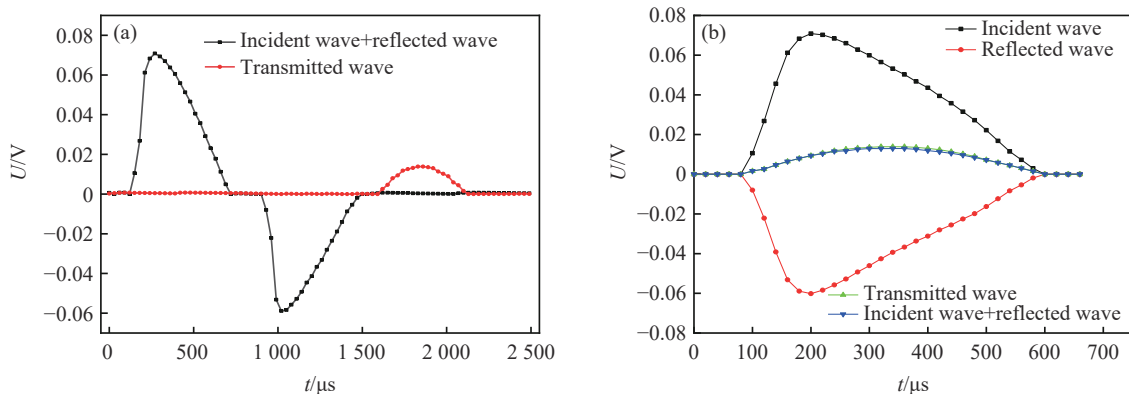


图 9 试样中应力平衡验证

Fig. 9 Verification of stress equilibrium in specimen

4 结 论

针对充填体 SHPB 试验测试中存在的透射波难以测量的问题开展研究, 提出利用岩杆代替钢杆改进 SHPB 试验系统, 得到以下结论:

(1) 基于 SHPB 试验原理, 提出了 SHPB 试验中波阻抗匹配公式; 结合 Kelvin-Voigt 模型, 得到了岩石杆和充填体波阻抗匹配系数 K 应满足的条件。

(2) 不同长杆的入射波波形相似, 透射波与入射波峰值的比值由大到小依次为: 绿砂岩、花岗岩、大理岩、玄武岩; 相同加载应力波和噪音环境下信噪比由大到小依次为: 绿砂岩、花岗岩、大理岩、玄武岩。不同长杆与充填体波阻抗匹配程度从好到差依次为: 绿砂岩、花岗岩、大理岩、玄武岩。

(3) 建立了以绿砂岩为入射杆和透射杆的摆锤冲击加载 SHPB 试验系统, 并验证了应力平衡假设, 证实了绿砂岩长杆 SHPB 装置用于测试充填体的动态力学特性的适用性。

参考文献:

- [1] 韩斌, 王贤来, 肖卫国. 基于多元非线性回归的井下采场充填体强度预测及评价 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 714-718.
HAN B, WANG X L, XIAO W G. Estimation and evaluation of backfill strength in underground stope based on multivariate nonlinear regression analysis [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(5): 714-718.
- [2] 王新民, 薛希龙, 张钦礼, 等. 碎石和磷石膏联合胶结充填最佳配比及应用 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46(10): 3767-3773. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.10.029.
WANG X M, XUE X L, ZHANG Q L, et al. Optimum ratio and application of joint cemented backfill with crushed rock and phosphogypsum [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3767-3773. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2015.10.029.

- [3] 王礼立,胡时胜.应力波基础[M].2版.北京:国防工业出版社,2023.
- [4] 李夕兵,古德生,赖海辉,等.岩石与炸药波阻抗匹配的能量研究[J].中南矿冶学院学报,1992,23(1):18–23.
LI X B, GU D S, LAI H H, et al. The energy analysis on matching of acoustic impedance between rock and explosive [J]. Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy, 1992, 23(1): 18–23.
- [5] 杨小林.炸药岩石阻抗匹配与爆炸应力、块度的试验研究[J].煤炭学报,1991,16(1):89–96.
YANG X L. Study of blasting stress, size and matched impedance between explosive and rock [J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(1): 89–96.
- [6] 刘希灵,崔佳慧,李夕兵,等.不同类型岩石中弹性波衰减特性研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3223–3230.
DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0604.
LIU X L, CUI J H, LI X B, et al. Study on attenuation characteristics of elastic wave in different types of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3223–3230. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0604.
- [7] 杨仁树,李炜煜,李永亮,等.3种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J].煤炭学报,2020,45(9):3107–3118.
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0853.
YANG R S, LI W Y, LI Y L, et al. Comparative analysis on dynamic tensile mechanical properties of three kinds of rocks [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3107–3118. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0853.
- [8] 杨仁树,李炜煜,方士正,等.波阻抗对岩石动力学特性影响的模拟试验研究[J].振动与冲击,2020,39(3):178–185.
DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.03.024.
YANG R S, LI W Y, FANG S Z, et al. Tests for effects of wave impedance on rock's dynamic performance [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3): 178–185. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.03.024.
- [9] 魏修成,卢明辉,巴晶,等.含黏滞流体各向异性孔隙介质中弹性波的频散和衰减[J].地球物理学报,2008,51(1):213–220.
DOI: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.01.026.
WEI X C, LU M H, BA J, et al. Dispersion and attenuation of elastic waves in a viscous fluid-saturated anisotropic porous solid [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(1): 213–220. DOI: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.01.026.
- [10] 王观石,李长洪,胡世丽,等.岩体中应力波幅值随时空衰减的关系[J].岩土力学,2010,31(11):3487–3492.
DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.11.022.
WANG G S, LI C H, HU S L, et al. A study of time-and spatial-attenuation of stress wave amplitude in rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3487–3492. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.11.022.
- [11] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(3): 471–478. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.11.006.
- [12] LI J C, MA G W. Analysis of blast wave interaction with a rock joint [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 777–787. DOI: 10.1007/s00603-009-0062-0.
- [13] 牛雷雷.黏弹性波传播及其诱致岩石损伤与破裂的研究[D].沈阳:东北大学,2016.
NIU L L. Viscoelastic wave propagation and induced damage and failure of the rock [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [14] NIU L L, ZHU W C, LI S H, et al. Determining the viscosity coefficient for viscoelastic wave propagation in rock bars [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(5): 1347–1359. DOI: 10.1007/s00603-018-1407-3.
- [15] 王梦,范立峰.岩体内应力波传播的研究进展与展望[J].北京工业大学学报,2021,47(7):802–814.
DOI: 10.11936/bjtxb2021030015.
WANG M, FAN L F. Research progress and prospect of stress wave propagation through rock mass [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(7): 802–814. DOI: 10.11936/bjtxb2021030015.
- [16] 李炜煜.冲击荷载下波阻抗对岩石动态力学响应影响的试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.
DOI: 10.27624/d.cnki.gzkb.2021.000006.
LI W Y. Experimental study on the influence of wave impedance on rock dynamic mechanical response under impact load [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2021. DOI: 10.27624/d.cnki.gzkb.2021.000006.
- [17] 李军强,刘宏昭,王忠民.线性粘弹性本构方程及其动力学应用研究综述[J].振动与冲击,2005,24(2):116–121.
DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2005.02.030.
LI J Q, LIU H Z, WANG Z M. Review on the linear constitutive equation and its dynamics applications to viscoelastic

- materials [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(2): 116–121. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2005.02.030.
- [18] 苑春方, 彭苏萍, 张中杰, 等. Kelvin-Voigt 均匀黏弹性介质中传播的地震波 [J]. *中国科学 D 辑地球科学*, 2005, 35(10): 957–962. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2005.10.006.
- YUAN C F, PENG S P, ZHANG Z J, et al. Seismic wave propagating in Kelvin-Voigt homogeneous visco-elastic media[J]. *Science in China Series D*, 2006, 49(2): 147–153. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2005.10.006.
- [19] 陶子豪. 动载下不同强度胶结充填体的动态响应特性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020. DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2020.000576.
- [20] 谢新良, 王博文, 张露予, 等. 基于应力波反射的磁致伸缩位移传感器测量方法及信号分析 [J]. *仪表技术与传感器*, 2017(5): 5–9. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2017.05.002.
- XIE X L, WANG B W, ZHANG L Y, et al. Measurement method for magnetostrictive displacement sensor based on stress wave reflection and signal analysis [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(5): 5–9. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2017.05.002.
- [21] 李地元, 成腾蛟, 周韬, 等. 冲击载荷作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 249–260. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.02.004.
- LI D Y, CHENG T J, ZHOU T, et al. Experimental study of the dynamic strength and fracturing characteristics of marble specimens with a single hole under impact loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 249–260. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.02.004.

(责任编辑 曾月蓉)