

花岗岩中应力波传播试验与数值模拟分析

高子涛¹, 马泽瑞¹, 汪书敏^{1,2*}, 王志亮¹, 尚晓梓¹, 毕云飞¹, 华正宇¹, 缪逢晨¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 蚌埠学院 经济与管理学院, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 为研究华山花岗岩中的应力波衰减规律, 基于花岗岩一维杆状试件的摆锤冲击试验, 探测和分析脉冲振幅衰减和信号传播特征。随后, 采用 LS-DYNA 商业软件和 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 本构开展对应的动态试验数值模拟与分析, 并将花岗岩岩杆应力波衰减时程的数值结果与试验结果对比, 验证 HJC 本构参数对华山花岗岩的适用性, 分析应力波在花岗岩中的传播及衰减规律。结果表明: 华山花岗岩中应力波的振幅随传播距离增加呈指数衰减, 衰减系数 η 约为 0.181。HJC 本构模型可有效模拟华山花岗岩中应力波的传播规律, 并基于试验结果确定了相应的 HJC 本构模型参数, 研究结果可为花岗岩矿山岩体爆破安全与稳定分析提供借鉴。

关键词: 花岗岩; 应力波; 冲击试验; 衰减规律; 数值模拟

中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2024)03-0029-07

Experimental and Numerical Simulation Analysis of Stress Wave Propagation in Granite

GAO Zitao¹, MA Zerui¹, WANG Shumin^{1,2}, WANG Zhiliang¹, SHANG Xiaozhi¹,
BI Yunfei¹, HUA Zhengyu¹, MIAO Fengchen¹

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Economics and Management, Bengbu College, Bengbu 233000, China)

Abstract: To investigate the stress wave attenuation in Huashan granite, pendulum impact tests are conducted on one-dimensional granite bar specimens to detect and analyze pulse amplitude attenuation and signal propagation features. Subsequently, dynamic test simulations and analyses are performed using LS-DYNA commercial software with the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) constitutive model. The numerical results of stress wave attenuation in granite rods are compared with experimental data to validate the applicability of the HJC parameters to Huashan granite and to analyze stress wave propagation and attenuation patterns. Results indicate that in Huashan granite, stress wave amplitude decays exponentially with increasing propagation distance, with an attenuation coefficient η of approximately 0.181. The HJC constitutive model effectively simulates stress wave propagation in Huashan granite, and the corresponding HJC model parameters are determined based on experimental results. These findings have provided valuable insights for the safety and stability analysis of mining explosions in granite rock masses.

Keywords: granite; stress wave; impact test; attenuation characteristic; numerical simulation

在地震、爆破等瞬时加载作用下, 岩体内介质质点发生扰动, 应力、应变在短时间内发生剧烈变化, 这种扰动在介质中由近及远的传播就是应力波^[1]。花岗岩于地壳岩体内分布广泛, 研究花岗岩中的应力波传播行为对地球物理学、围岩稳定性评估和地震风险评估等具有重大意义。

在脆性材料动态特性的研究中,常采用动态试验系统进行研究^[2].目前,霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)和摆锤冲击试验已成为应变率为 $10^1 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 的岩石动态单轴试验、三轴试验和劈裂试验的主要研究手段,可在微秒级时间内得到动态应力应变关系、应变率和动态增强因子等反映岩石动力学特性的基本参量^[3],这些基本参量是深入研究岩石动力学特性规律的试验依据.常聚才等^[4]研究得出不同冲击气压下端锚锚固体应力波峰值应变均呈指数形式衰减,且空间衰减幅值及衰减指数与冲击气压呈正相关;李庆华等^[5]采用霍普金森压杆试验加载超高韧性水泥基复合材料试件,研究其应力波传播的规律,通过试验直接确定超高韧性水泥基复合材料的动态本构方法;于潇等^[6]研究珊瑚砂中应力波衰减规律,得到无量纲峰值应力随传播距离衰减的拟合公式;金解放等^[7]采用 SHPB 动静组合加载试验装置研究变截面红砂岩的应力波传播规律,在轴向静应力增量相同的情况下,应力峰值随距离增加呈指数衰减;巫绪涛等^[8]采用 Hopkinson 杆加载混凝土长试样得出 2 种衰减机制,低于屈服应力的弹性波呈线性衰减,超过屈服应力的黏塑性波呈指数衰减.上述研究表明,目前对脆性材料中应力波传播规律的试验研究已具备一定的研究基础.

数值模拟可降低成本,能便捷灵活地开展科学研究.廖铁平等^[9]采用 LS-DYNA 有限元软件分析,采用条形装药接触爆炸方式标定材料模型参数,并通过不同装药方式研究混凝土自由场应力波衰减规律;马文伟等^[10]应用 LS-DYNA 软件模拟分析柱状装药方式下围岩体应力波衰减规律,发现通过幂函数拟合得到的结果与理论计算结果相近;汪书敏等^[11]基于时域递归方法和有限差分程序探究含平行黏弹性节理的岩体中的应力波传播,发现节理厚度和条数的增加都会导致应力波衰减;高鑫等^[12]采用 Kong-Fang 混凝土材料模型和 LS-DYNA 数值分析的方式实现了对混凝土中应力波传播衰减的高精度数值模拟.以上综述表明,目前针对华山花岗岩中应力波传播与衰减行为的试验与数值模拟的综合研究仍较少.

本研究采用摆锤冲击试验系统对华山花岗岩进行一维应力波传播测试研究,对华山花岗岩的波能衰减模式进行深入探讨.此外,结合 ANSYS/LS-DYNA 有限元数值分析方法,依据 HJC 本构模型进行数值模拟分析,并将数值计算结果与 SHPB 试验结果进行对比,验证花岗岩中应力波传播分析模型参数的有效性,力求得出具有参考价值的结论.

1 花岗岩岩杆冲击试验

1.1 摆锤冲击试验系统

采用尺寸为 $\Phi 70 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$ 的岩杆作为应力波传播的试验对象,花岗岩岩杆如图 1 所示,该岩杆钻取自一块均质完整的华山花岗岩.前期试验表明该批次岩石的单轴抗压强度约为 140 MPa,弹性模量为 20 GPa,波速 3 509 m/s^[13].该批次花岗岩在不同应变率下的动态抗压强度如表 1 所示.采用摆锤对岩杆进行冲击,摆锤冲头为短圆柱形高强度镍合金钢,该冲头形成的波形相对较短,在传播过程中可有效避免波形重叠.杆长 1 000 mm,可调整摆锤的倾角控制冲头撞速.将 3 组半导体应变片分别布置于距撞击端 100, 500 和 700 mm 的位置,以探测轴向应力脉冲在不同距离处的信号数据.3 组半导体应变片分别记作 A-1, A-2 和 A-3.电信号采集方式为半桥式连接桥路,对边双片工作模式.试验装置如图 2 所示.

1.2 试验结果与分析

如图 2,摆锤倾角设为 10° ,当摆锤摆至最低点时撞击花岗岩右端,在岩杆内形成半正弦脉冲,并以压缩波的形式向左行进,脉冲将抵达岩杆左侧并于自由端面反射,再以拉伸波形式向右传播,最终以此形式在两端面间往复行进.该过程中,脉冲波能逐渐散失,同一点处采集的应力波幅值随时间衰减.粘贴在花岗岩岩杆中点位置的 A-2 应变片的数据显示,当岩杆的长度大于应力波的波长时,该处应力波受到反射重叠效应的影响较小,且由于反射作用,压缩波与拉伸波幅值的间距恒为 1 000 mm,可以据此分析应力波幅值与应力波传播距离之间的关系.

表 1 花岗岩动态力学强度^[14]

编号	试件高度/cm	试件直径/cm	密度/(g·cm ⁻³)	应变率/s ⁻¹	动态抗压强度/MPa
1-1	4.9	2.5	2.6	106.0	180.0
1-2	4.8	2.5	2.6	111.8	195.3
1-3	4.9	2.5	2.6	119.8	210.0
1-4	4.8	2.5	2.6	146.3	239.4
1-5	4.9	2.5	2.6	170.3	258.3

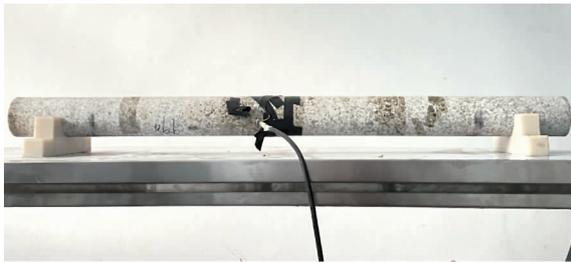


图 1 花岗岩岩杆

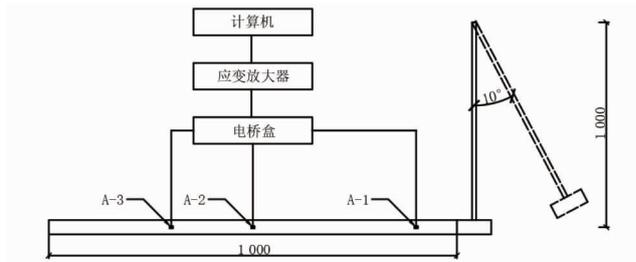


图 2 试验设备及采集系统(单位:mm)

采集应变片 A-1, A-2, A-3 的信号并换算得到应力时程图,其中 A-2 采集到的应力波时程图如图 3 所示,随着传播时间和传播距离的增加,压缩波和拉伸波都分别呈现上升沿时程延长、脉宽增大、应力幅值和介质扰动速度显著降低、波形逐渐趋于平缓的衰减规律.该现象是由应力波的弥散效应以及花岗岩介质对应力波能量耗散作用共同导致.崔新壮等^[15]通过理论分析,得到高应变岩石中一维应力波的衰减规律可表示为

$$\sigma_{(x)} = \sigma_0 e^{-\eta x} \tag{1}$$

式中: $\sigma_{(x)}$ 为波于岩杆中行进一段距离后的应力峰值; σ_0 为初始扰动位置对应的应力峰值; η 为指数衰减系数; x 为传播距离.

式(1)表明,岩石应力波随传播距离以指数形式衰减,且仅需 2 个拟合参数就可以实现对衰减规律的描述,具有很好的可实施性.随着时间和传播距离增加,杆中正向应力波与负向应力波的叠加可能导致冲波振幅与实际相出入.因此,截取前 5 次脉冲的时程(图 4),并基于其幅值拟合花岗岩中的应力波衰减.

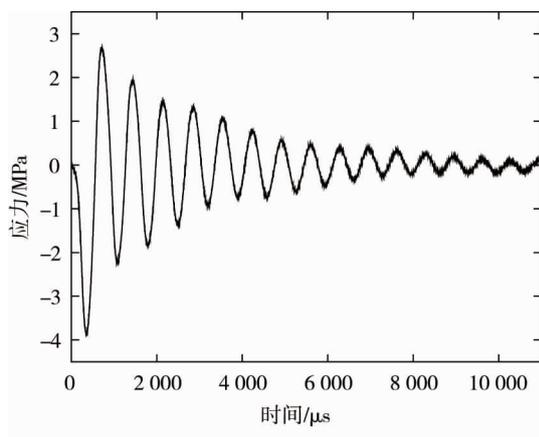


图 3 应变片 A-2 采集的应力波时程

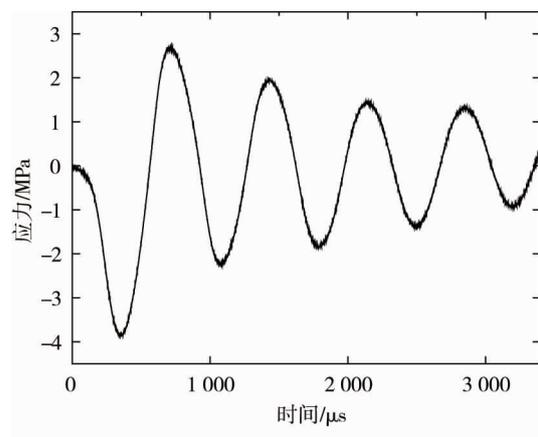


图 4 前 5 次脉冲的时程

通过指数函数拟合应力波的前 5 个脉冲幅值(见图 5),得到研究对象的衰减参数,即初始扰动幅值 $\sigma_0 = 4.08 \text{ MPa}$,衰减系数 $\eta = 0.181$,相关性系数为 0.96,该拟合曲线可以很好地描述花岗岩岩杆前 5 个应力波脉冲幅值的衰减规律,具体拟合方程为

$$\sigma_{(x)} = 4.08 e^{-0.181x} \tag{2}$$

应变片 A-1 和 A-3 测得的数据中,第一束脉冲的幅值,即压缩波传播到 100 mm 和 700 mm 处的幅值,重叠效应小,可用于验证拟合曲线.将这 2 处幅值与拟合曲线置于同一坐标系下,如图 6 所示,在 700 mm 处的应力峰值相较于指数拟合结果偏小,一方面是由于应力波前端已经抵达岩杆远端并发生反射,该点接收到的正向应力波与负向应力波重叠抵消,导致应力幅值偏小;另一方面反映了应力波传播过程中的整体性规律,前期应力波幅值衰减速率较快,而后期随着应力波传播,携带的能量逐渐消散,应力波衰减速率逐渐放缓.应变片 A-3 的实测数据与拟合结果误差约为 10.6%,在可接受的误差范围内,进一步验证了该指数函数拟合公式可以很好地描述花岗岩中应力波传播过程的衰减规律.

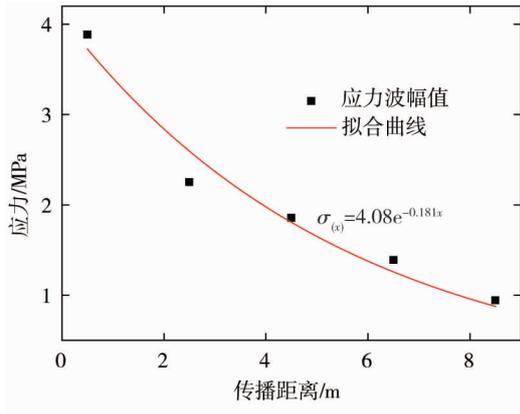


图5 应力波传播规律拟合

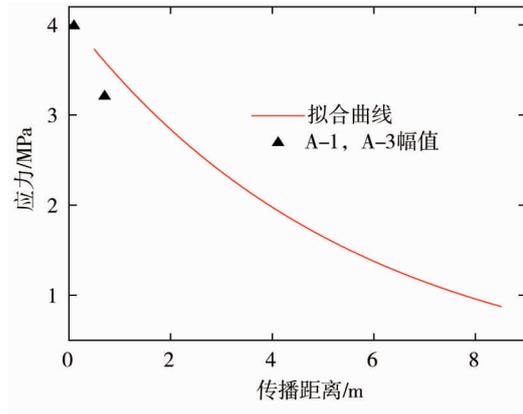


图6 试验数据与拟合结果

2 数值模拟分析

2.1 数值建模

使用 ANSYS 有限元软件构建与试验同尺寸的冲头及岩杆模型,并划分计算单元网格(见图 7).冲头与岩杆均选用 Solid 164 八节点六面体单元,该单元可用于三维显式结构实体的建模.花岗岩岩杆在径向上划分为 72 份,轴向上单元长度为 1 mm;冲头的尺寸相对较小,轴向上单元长度取 0.5 mm.冲头与杆件间的接触采用自动面面接触,忽略接触面间的摩擦,采用罚函数接触算法来减少沙漏效应,接触刚度罚函数因子 f_s 取值为 2.根据机械能守恒可得到摆锤落至水平位置时的速度约为 0.55 m/s,故给冲头施加 0.55 m/s 的轴向速度作为初始条件.

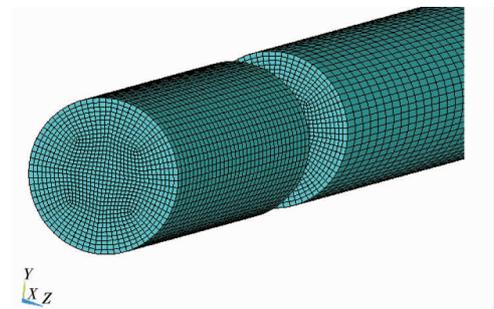


图7 冲头及岩杆的网格划分

2.2 HJC 本构

高强度镍合金钢冲头采用线弹性本构.该材料本构符合广义线性胡克定律,主要模型参数包括材料密度 $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,泊松比 $\lambda = 0.25$.花岗岩采用 HJC 动态本构模型.该模型最早由 HOLMQUIST 和 JOHNSON 提出^[16],类似于模拟金属材料的 JC (Johnson-Cook) 本构,主要包括强度模型、损伤模型和状态方程,不包含强化规律、流动法则和一致性条件.

HJC 本构屈服面方程基于标准化等效应力来定义,可表示为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq S_{\max}; \quad (3)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma'}{f'_c}; \quad (4)$$

$$P^* = \frac{P}{f'_c}. \quad (5)$$

式中: σ^* 为标准化等效应力,按式(4)确定; σ' 为实际等效应力; f'_c 为准静态单轴抗压强度; P^* 为标准化

水压力,按式(5)确定; P 为实际静水压力; D 为由损伤函数确定的损伤参数,定义为损伤度($0 \leq D \leq 1.0$); A, B 分别为量纲归一化内聚强度系数和量纲归一化压力系数; C, N 分别为应变率系数和应变硬化指数; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲应变率(其中 $\dot{\varepsilon}$ 为真实应变率, $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率); S_{\max} 为最大量纲归一化强度.

岩石材料的破坏主要是内部缺陷连通造成损伤累积引起塑性屈服和体积应变的宏观表现,因此 HJC 本构基于这两者描述损伤参数 D , 损伤演化方程表示为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{f, \min}. \quad (7)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$, $\Delta \mu_p$ 分别为材料常压下一个计算循环内等效塑性应变的增量和等效塑性体积应变增量; ε_p^f 和 μ_p^f 为材料在压力 P 下产生的破碎应变,分别为等效塑性应变和塑性体积应变; $T^* = T/f_c$ 为无量纲抗拉强度,其中 T 为材料的拉伸强度,当 $P^* = -T^*$ 时,材料不再承受任何塑性应变; D_1 和 D_2 为控制材料损伤程度的参数; $\varepsilon_{f, \min}$ 为材料破坏时的最小塑性应变.

HJC 模型中材料静水压力-体积应变方程常用三段式状态方程来表示,由线弹性阶段、塑性应变阶段和完全压实阶段状态方程组成.

1) 线弹性阶段.材料在加载初期的小变形下,表现出明显的线弹性特征,用体积模量 K 表示:

$$K = P_{\text{crush}}/\mu_{\text{crush}}; \quad (8)$$

式中: P_{crush} 为弹性极限时的静水压力, μ_{crush} 为弹性极限时对应的体积应变.

2) 塑性应变阶段.该阶段由于岩石微小缺陷压缩产生塑性变形,加载过程通过端点插值表示:

$$P = P_{\text{crush}} + K_{\text{lock}}(\mu - \mu_{\text{crush}}); \quad (9)$$

$$K_{\text{lock}} = \frac{P_{\text{lock}} - P_{\text{crush}}}{\mu_{\text{lock}} - \mu_{\text{crush}}}. \quad (10)$$

式中: P_{lock} 为压实静水压力; K_{lock} 为压实静水压力下对应的体积模量; μ 为体积应变; μ_{lock} 为达到压实静水压力时对应的体积应变.

3) 完全压实阶段.此时岩石完全破碎,内部缺陷被填满且处于高压紧实状态,充分考虑材料应变率和损伤参数的影响,加载时压力与体积满足三次多项式:

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3; \quad (11)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{\text{lock}}}{1 + \mu_{\text{lock}}}. \quad (12)$$

式中: K_1, K_2, K_3 均为材料参数; $\bar{\mu}$ 为体积应变的修正值.

2.3 模型参数确定

基于以上 HJC 模型函数,共需确定 21 个模型参数用于数值模拟计算.石恒等^[17]通过结合物理力学试验和敏感参数试算的方法确定了黑云母花岗岩的 HJC 模型参数.本文试验中所使用的华山花岗岩的力学特性与黑云母花岗岩相近,故根据已确定的模型参数并结合岩杆摆锤冲击试验的结果进行调整.

通过应变率为 10^{-4} s^{-1} 物理力学试验确定基本参数.其中单轴抗压强度 $f_c = 140 \text{ MPa}$, 剪切模量 $G = 12.5 \text{ GPa}$, 体积模量 $K = 19.9 \text{ GPa}$, 抗拉强度 $T = 3.1 \text{ MPa}$, 密度 $\rho_0 = 2620 \text{ kg/m}^3$.

通过式(11)拟合 Hugoniot 数据曲线得到材料参数 K_1, K_2, K_3 , 在缺少试验数据的情况下,可以使用 Hugoniot 经验公式拟合:

$$P = \frac{H^2 \rho_0 \mu (\mu + 1)}{[(1 - Q) \mu + 1]^2}. \quad (13)$$

式中: H, Q 为经验常数, $H = 2100 \text{ m/s}$, $Q = 1.63$ ^[18].

Hugoniot 经验曲线数据点和拟合曲线如图 8 所示,得到材料参数 $K_1 = 12 \text{ GPa}$, $K_2 = 17 \text{ GPa}$, $K_3 =$

61 GPa.根据摆锤冲击试验结果及试样参数的敏感性对参数进行标定,通过不断试错与对比,最终确定HJC模型参数并汇总如表2所示.

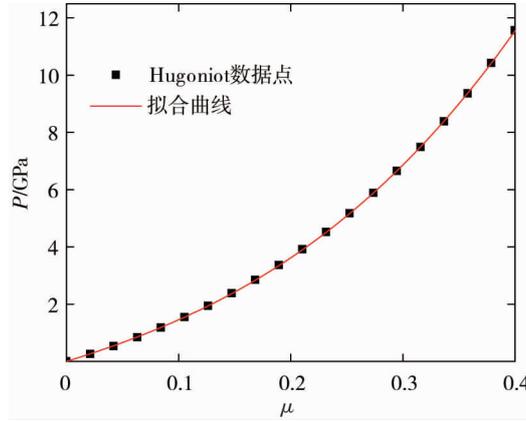


图8 材料参数拟合

表2 花岗岩的HJC本构模型参数

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	f_c/MPa	G/GPa	T/MPa	A	B	C
2.62	140	12.5	3.1	0.36	1.84	0.001 4
N	P_{crush}	μ_{crush}	P_{lock}	μ_{lock}	K_1/GPa	K_2/GPa
0.79	46	0.002 3	1.49	0.031	12	17
K_3/GPa	$\epsilon_{l,min}$	D_1	D_2	S_{max}	$\dot{\epsilon}_0/s^{-1}$	f_s
61	0.01	0.04	1	15	10^{-4}	2

2.4 数值模拟结果与对比验证

使用LS-DYNA运行ANSYS建立的有限元模型,赋予相应的材料模型参数、边界条件、初始状态等,然后经过计算得到冲头撞击后10 000 μs 内岩杆的应力波动态信号,选取A-2位置处的应力波绘制时程图,如图9所示.相较于试验结果,数值模拟得到的应力波波形上升沿稍短,这是因为采用数值模拟本构未能表现出天然岩杆中存在的微缺陷对波形的弥散与延滞作用.随着传播时间或传播距离的增加,应力幅值和介质扰动速度显著降低,波形逐渐趋于平缓.数值模拟得到的振幅衰减规律与图3所示的试验结果基本一致,仍以式(1)拟合应力波的前5个脉冲幅值,如图10所示.计算得到参数 $\sigma_0 = 4.15 MPa, \eta = 0.184$,相关性系数为0.99,与实测结果拟合度相比,数值模拟条件更为理想化,可以得到与理论推导拟合度更高的结果.具体拟合方程为

$$\sigma_{(x)} = 4.15e^{-0.184x} \tag{14}$$

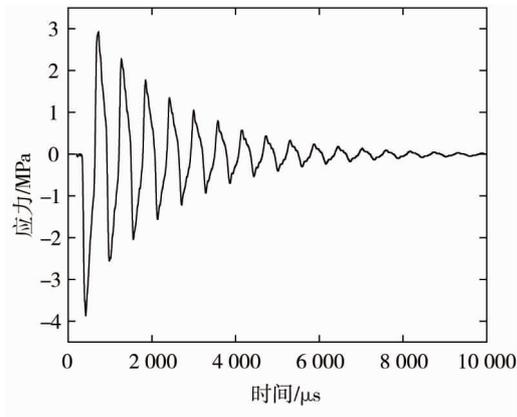


图9 数值计算应力波时程

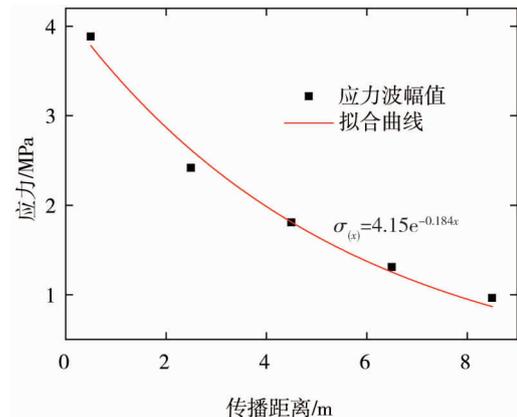


图10 数值计算传播规律拟合

对比式(14)和式(2)可知,计算结果与试验结果较为吻合,因此可认为选取的HJC模型及其参数可以

很好地模拟花岗岩中应力波的传播及衰减规律.

3 结论

1) 摆锤冲击试验可有效探究花岗岩岩杆中的应力波衰减规律,试验表明华山花岗岩中应力波振幅与传播距离呈指数衰减关系,确定所得指数衰减系数 η 约为 0.181,研究结果可为矿山岩体工程动力灾害预测与评估提供参考.

2) 基于试验结果证实了采用 HJC 本构模型描述岩体应力波传播分析的合理性,并综合确定了适用于花岗岩岩体的 HJC 模型参数,可为后续以花岗岩为主要岩体的矿山爆破安全与稳定性仿真分析提供借鉴.

参考文献:

- [1] 戴俊.岩石动力学特性与爆破理论[M].2版.北京:冶金工业出版社,2013.
- [2] 周子龙,李夕兵,岩小明.岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12): 2445-2452.
- [3] 吴顺川.岩石力学[M].北京:高等教育出版社,2021.
- [4] 常聚才,齐潮,殷志强,等.动载作用下端锚锚固体力学响应特征研究[J].岩土力学,2022,43(12):3294-3304.
- [5] 李庆华,舒程岚青.超高韧性水泥基复合材料的波传播试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(5):851-857.
- [6] 于潇,陈力,方秦.珊瑚砂中应力波衰减规律的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1520-1529.
- [7] 金解放,王熙博,袁伟.轴向静载荷作用下变截面红砂岩应力波衰减特性试验研究[J].矿业研究与开发,2020,40(5): 119-125.
- [8] 巫绪涛,廖礼.脆性材料中应力波衰减规律与层裂实验设计的数值模拟[J].爆炸与冲击,2017,7(4):705-711.
- [9] 廖铁平,张尚根,周早生,等.不同装药形式混凝土自由场应力波衰减规律的数值分析[J].工业建筑,2007,37(增刊1): 230-233.
- [10] 马文伟,李江涛,梁文勳,等.爆炸应力波作用下岩石破坏数值分析[J].煤矿安全,2015,46(9):188-191.
- [11] 汪书敏,王志亮,贾帅龙,等.黏弹性节理岩体中应力波的传播特性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(2): 99-107.
- [12] 高鑫,孔祥振,方秦,等.混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2022,42(12):68-80.
- [13] 贾帅龙.花岗岩体热力学特性及其应力波传播规律研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [14] 田诺成.循环荷载作用下花岗岩动力学性能与累积损伤演化规律研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [15] 崔新壮,李卫民,段祝平,等.爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究[J].爆炸与冲击,2001,21(1):76-80.
- [16] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(5): 051003.
- [17] 石恒,王志亮,石高扬,等.实时温度下花岗岩动态压缩破坏特性试验与数值研究[J].岩土工程学报,2019,41(5): 836-845.
- [18] 方秦,孔祥振,吴昊,等.岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J].工程力学,2014,31(3):197-204.