

DOI: 10.11779/CJGE201612021

摆型波传播过程块系岩体能量传递规律研究

王凯兴^{1,2}, 潘一山¹, 窦林名²

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 深部岩体工程存在一种特殊的岩体动力现象即摆型波传播现象, 摆型波在岩体中低频低速传播并伴随着较大的岩体能量传递。针对摆型波传播过程块系岩体的能量传递规律, 基于深部岩体的非连续自平衡应力等级块系构造理论, 研究摆型波传播过程块系岩体中岩块与其周围软弱介质之间的能量转化规律, 分析自应力块系岩体中的能量传递规律。经分析得到: 摆型波传播过程块系岩体的能量转化表现为岩块的动能和其周围软弱介质的势能之间存在相互转化, 动能和势能在相互转化过程中不断向前传递, 给出块系岩体能量传递与转化的表达式, 并通过计算分析得到块系岩体局部区域能量变化呈现周期递减规律以及整个块系岩体的动能和势能变化符合指数耗散规律。

关键词: 岩石力学; 摆型波; 块系岩体; 能量; 动力传播

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)12-2309-06

作者简介: 王凯兴(1984-), 男, 辽宁丹东人, 博士, 主要从事冲击地压和块系岩体动力传播研究。E-mail: kaixing_wang@163.com。

Energy transfer in block-rock mass during propagation of pendulum-type waves

WANG Kai-xing^{1,2}, PAN Yi-shan¹, DOU Lin-ming²

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resource and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The pendulum-type wave is a special rock mass dynamic phenomenon in deep rock mass engineering. It is the propagation with low frequency and low speed in rock mass, which carries the obvious energy propagation. According to the energy transfer rules in the propagation process of pendulum-type waves in block-rock mass, the laws of the energy transformation between rock block and nearby weak medium is studied based on the block-hierarchical theory of deep rock mass which is composed of discontinuous and self-balance stress block-rock. The laws of energy transfer in block-rock mass with self-balance stress are investigated through analysis. The energy conversion in the block-rock mass is the mutual transformation between the kinetic energy of the rock block and the elastic potential energy of the nearby weak medium during propagation of pendulum-type waves. The kinetic energy and elastic potential energy transfer forward on during mutual transformation of energy. The expression for energy transfer and transformation in block-rock mass is given. Through calculation and analysis, the laws of energy variation in local area exhibits cyclic attenuation, and the variation and dissipation of kinetic energy and elastic potential energy have exponential relationship in the whole block-rock mass.

Key words: rock mechanics; pendulum-type wave; block-rock mass; energy; dynamic propagation

0 引言

摆型波是深部块系岩体动力传播的一种特殊现象,集中反映了深部岩体的非连续和非协调变形过程。摆型波传播将诱发岩体较大幅度的摆动相比岩体中的纵波和横波岩体能量转化过程更为明显,极易诱发冲击地压等动力灾害。尤其进入深部开采,岩体的构造特性和扰动传播特性等都是诱发冲击地压的重要因素。Sadovsky^[1]提出深部岩体等级块系构造理论,即深部岩体是由从晶体到岩体不同等级的具有软弱力学

特性的裂隙所分割的块体结构。同时, Kurlenya 等^[2]发现深部岩体受爆炸作用产生信号交错变化的现象,在爆炸作用下岩体内形成空腔时,岩块周围发生块体间不同符号的位移相互对应的摆动,由此推测存在一种新型弹性波,并称其为摆型波。摆型波研究已成为深部岩体动力响应的崭新课题。俄罗斯学者对块系岩体摆型波传播研究做出重要贡献, Kurlenya 等^[3-5]在俄

基金项目: 国家自然科学基金项目(51404129; 51174107); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM15KF05)

收稿日期: 2015-10-17

境内多个深部矿区岩爆、地震、大当量地下爆炸试验中观测到摆型波现象,同时 Kurlenya 等^[6]从实测岩爆、化爆和块体模型施加脉冲载荷中分离出摆型波波形图,如图 1 所示。

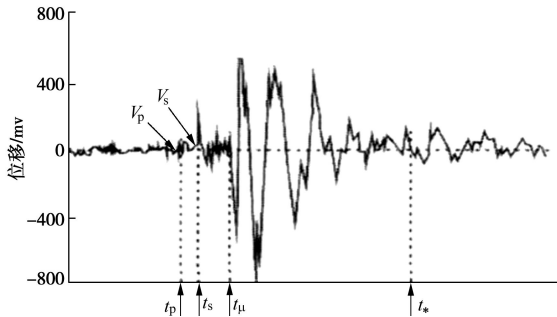


图 1 地下爆炸时典型位移波形图

Fig. 1 Typical waveform of displacement for underground explosion

在图 1 中, t_p 和 t_s 分别为纵波和横波到达时间, t_u 为摆型波到达时间, t_* 为摆型波记录时间, V_p 和 V_s 分别为纵波和横波波速, 这里纵坐标为位移幅值用电压表示。Aleksandrova 等^[7-10]基于具有软弱夹层介质的一维钢杆模型在冲击作用下的应力波传播试验, 证明了摆型波的存在, 同时在块系介质冲击响应试验及深部爆炸和岩爆时的波谱分析中得到摆型波非线性低频低速传播特性。Slepyan 等^[11-12]针对摆型波动力传播分别对线性和非线性弹簧以及弹性块体组成的周期块体系统动力传播特性进行了理论分析。Aleksandrova^[13]给出了块体间具有黏弹性介质的一维摆型波动力传播模型。中国学者也对摆型波传播展开了相关研究, 钱七虎^[14]给出摆型波对预测冲击地压有价值的 3 个临界动力特征参数。王明洋等^[15-16]基于块体理论模型分析了块系岩体介质的变形与运动特性。王德荣等^[17]研究了深部岩体动态特性试验系统。戚承志等^[18]对深部岩体构造层次及其成因进行了分析。吴昊等^[19]对摆型波研究进展进行了综述。潘一山等^[20-21]对摆型波传播过程岩体的动力响应特征做了理论分析。

摆型波相比于纵波和横波以较大的幅值低频低速在块系岩体中传播, 极易诱发岩体冲击动力灾害。Aleksandrova^[22]指出, 摆型波传播过程的岩体能量传递规律需要进一步从理论上进行分析, 其中块体间软弱连接部分的黏弹性力学性质是扰动传播过程影响能量传递与耗散的一个重要原因。因此本文将对摆型波传播过程块系岩体的能量传递与耗散特性进行研究, 分析摆型波传播过程自应力块系岩体中的能量转化与传递规律。通过块系岩体动力传播的能量传递研究, 将对认识深部岩体冲击动力灾害具有重要意义。

1 块系岩体能量传递理论分析

1.1 块系岩体摆型波传播理论模型

Aleksandrova 等^[22]给出块系岩体摆型波动力传播理论模型如图 2。摆型波传播介质为一组具有非连续自平衡应力特征的块系岩体组成。岩块间具有软弱连接介质并简化为黏弹性介质, 弹性系数为 k_i , 阻尼系数为 c_i , 岩块相比于块体间的软弱连接介质可抽象为刚体其质量为 m_i , 在冲击扰动 $f(t)$ 作用下第 i 块岩块的位移为 x_i , 整个块系岩体由 n 个岩块及岩块间的软弱连接介质组成。

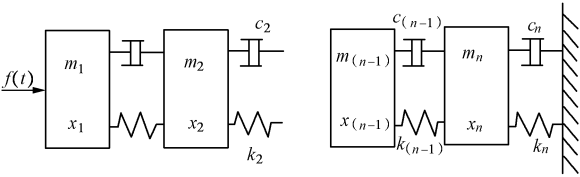


图 2 摆型波动力传播模型

Fig. 2 Dynamic model for propagation of pendulum-type waves

自平衡应力块系岩体介质近似为弹性体, 块体间的软弱夹层介质为黏弹性凯尔文体组合模型, 其中弹性表征夹层介质对能量的传递, 黏性阻尼表征夹层介质对能量的阻滞。下面基于此模型分析冲击扰动在块系岩体中诱发摆型波传播时岩块的位移和速度动力响应。令冲击扰动 $f(t)$ 满足块系岩体中摆型波传播的能量条件^[23], 则摆型波传播过程块系岩体动力响应微分方程的矩阵形式为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n \end{bmatrix}, \quad (1a)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & & & \\ -c_1 & (c_1 + c_2) & -c_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -c_{i-1} & (c_{i-1} + c_i) & -c_i \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & -c_{n-1} \\ & & & & -c_{n-1} & (c_{n-1} + c_n) \end{bmatrix}, \quad (1b)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & & & \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -k_{i-1} & (k_{i-1} + k_i) & -k_i \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & -k_{n-1} \\ & & & & -k_{n-1} & (k_{n-1} + k_n) \end{bmatrix}, \quad (1c)$$

$$x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T, \quad (1d)$$

$$F(t) = [f(t), 0, \dots, 0]^T. \quad (1e)$$

引入恒等式

$$M\dot{x}(t) - M\dot{x}(t) = 0, \quad (2)$$

将式 (1) 与 (2) 合并得

$$\begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

令 $y(t) = [x(t) \ \dot{x}(t)]^T$, 于是式 (3) 可写为

$$A\dot{y}(t) + By(t) = \tilde{f}(t). \quad (4)$$

$$\text{式中, } A = \begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix}, \tilde{f}(t) = \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

则可以得到在初始脉冲扰动 $f(t)$ 作用下式 (4) 的解为

$$y(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t), \dot{x}_1(t), \dots, \dot{x}_n(t)]^T = \Phi dq_0. \quad (5)$$

由此得到块系岩体摆型波传播时, 各岩块的位移和速度动力响应。式 (5) 中: 矩阵 Φ 由状态空间中 $2n$ 阶非对称实矩阵 $B^{-1}A$ 的广义特征向量 ϕ_i 所张成, 即 $B^{-1}A\phi_i = \phi_i / \lambda_i$ 。 $d = \text{diag}(e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}, \dots, e^{\lambda_{2n} t})$ 且 λ_i 为广义特征向量 ϕ_i 所对应的特征值; $q_0 = a^{-1}\Phi^T A y(0)$ 且 $a = \Phi^T A \Phi = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_{2n})$, $y(0)$ 为初始条件, 在初始脉冲扰动 $f(t)$ 作用下, 初始条件为 $y(0) = [0, \dots, 0, v_1, 0, \dots, 0]$, 即冲击端岩块的初始扰动速度为 v_1 其余各块体的初始扰动速度为零, 同时, 各岩块的初始位移均为零。

1.2 块系岩体动能传递理论分析

由于岩块相比于块体间的软弱连接介质可抽象为刚体, 所以在摆型波传播过程中岩块只具有动能。若第 i 块岩块的速度为 \dot{x}_i , 则在能量传递过程中第 i 块岩块的动能及整个块系岩体的动能分别为

$$E_n(t) = \frac{1}{2} m_n \dot{x}_n^2(t) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n), \quad (6)$$

$$E_k(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \dot{x}_i^2(t). \quad (7)$$

令 $B^{-1}A\phi = \frac{1}{\lambda}\phi$ 的第 r 对共轭特征值分别为

$\lambda_r = -\beta_r + j\omega_r$ 和 $\bar{\lambda}_r = -\beta_r - j\omega_r$, 其中 $\beta_r > 0$, $\omega_r > 0$, 相应的共轭特征向量分别为 φ_r 和 $\bar{\varphi}_r$ 。由微分方程基本理论可知, 第 r 对共轭特征值和共轭特征向量引起的块系岩体运动为

$$x_r(t) = \varphi_r e^{\lambda_r t} + \bar{\varphi}_r e^{\bar{\lambda}_r t} = 2e^{-\beta_r t} [\text{Re}(\varphi_r) \cos \omega_r t - \text{Im}(\bar{\varphi}_r) \sin \omega_r t], \quad (8)$$

式 (8) 可变形为向量形式

$$x_r(t) = e^{-\beta_r t} \begin{bmatrix} a_{1r} \cos(\omega_r t + \theta_{1r}) \\ \vdots \\ a_{nr} \cos(\omega_r t + \theta_{nr}) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中, $a_{ir} = 2\sqrt{\text{Re}^2(\varphi_{ir}) + \text{Im}^2(\varphi_{ir})}$, $\theta_{ir} = \arctan\left(\frac{\text{Im}(\varphi_{ir})}{\text{Re}(\varphi_{ir})}\right)$, $i=1, 2, \dots, n$ 。对具有 n 个岩块的块

系岩体而言共有 n 对共轭特征值和相应的共轭特征向量, 因此, 在整个块系岩体中岩块的位移响应向量为

$$x = \sum_{r=1}^n x_r. \quad (10)$$

进一步可知, 岩块 x_i 的位移和速度响应分别为

$$x_i = \sum_{r=1}^n x_{ir} = \sum_{r=1}^n e^{-\beta_r t} a_{ir} \cos(\omega_r t + \theta_{ir}), \quad (11)$$

$$\dot{x}_i = \sum_{r=1}^n -e^{-\beta_r t} b_{ir} \cos(\omega_r t + \theta_{ir} - \theta'_{ir}). \quad (12)$$

其中, $b_{ir} = \sqrt{(\beta_r a_{ir})^2 + (\omega_r a_{ir})^2}$, $\theta'_{ir} = \arctan\left(\frac{\omega_r}{\beta_{ir}}\right)$,

($i=1, 2, 3, \dots, n$)。因此, 整个块系岩体的动能为

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \left[\sum_{r=1}^n (\lambda_r \varphi_{ir} e^{\lambda_r t} + \bar{\lambda}_r \bar{\varphi}_{ir} e^{\bar{\lambda}_r t}) \right]^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \left[\sum_{r=1}^n e^{-\beta_r t} b_{ir} \cos(\omega_r t + \theta_{ir} - \theta'_{ir}) \right]^2. \quad (13)$$

1.3 块系岩体势能传递理论分析

在摆型波传播过程中, 岩块间的软弱连接部分为可变形体且假设发生均匀变形, 则岩块间软弱介质的能量主要表现为由软弱连接介质变形而引起的弹性势能, 如图 3 所示。岩块间的弹性势能与软弱连接介质的自身力学性质及变形有关。在整个动力传播过程中, 岩块间的软弱介质变形取决于相邻块体的相对位移。

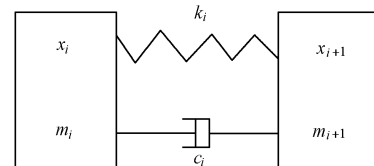


图 3 具有黏弹性连接的相邻块体模型

Fig. 3 Model for adjacent blocks with visco-elastic linkage

令 $f_i(t)$ 为岩块 x_i 与 x_{i+1} 之间软弱连接介质的外部载荷, 岩块间软弱连接介质的势能主要由于其弹性性质引起, 因此考虑介质弹性时 $f_i(t)$ 可表示为

$$f_i(t) = k_i \cdot \Delta x_i, \quad (14)$$

其中

$$\Delta x_i = x_i - x_{i+1}. \quad (15)$$

因此, 在摆型波传播过程中, 岩块 x_i 和 x_{i+1} 之间软弱连接介质的势能及整个块系岩体的势能分别为

$$E_{p(i)}(t) = \int_0^{\Delta x_i} f_i(t) d(\Delta x_i) = \frac{1}{2} k_i \cdot \Delta x_i^2, \quad (16)$$

$$E_p(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Delta x_i^2. \quad (17)$$

同时, 由式 (11)、(15) 可知

$$\Delta x_i = \sum_{r=1}^n e^{-\beta_r t} a_{ir} \cos(\omega_r t + \theta_{ir}) - \sum_{r=1}^n e^{-\beta_{r+1} t} a_{i+1,r} \cos(\omega_r t + \theta_{i+1,r}) \quad (18)$$

因此, 由式 (17)、(18) 可知整个块系岩体的势能为

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{r=1}^n (\varphi_{ir} e^{\lambda_r t} + \bar{\varphi}_{ir} e^{\bar{\lambda}_r t}) - \sum_{r=1}^n (\varphi_{i+1,r} e^{\lambda_r t} + \bar{\varphi}_{i+1,r} e^{\bar{\lambda}_r t}) \right]^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{r=1}^n e^{-\beta_r t} a_{ir} \cos(\omega_r t + \theta_{ir}) - \sum_{r=1}^n e^{-\beta_{r+1} t} a_{i+1,r} \cos(\omega_r t + \theta_{i+1,r}) \right]^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{r=1}^n e^{-\beta_r t} \sqrt{l_{ir}^2 + p_{ir}^2} \cos(\omega_r t + \theta_{ir}'') \right]^2 \quad (19) \end{aligned}$$

式中, $\theta_{ir}'' = \arctan\left(\frac{p_{ir}}{l_{ir}}\right)$, $l_{ir} = (a_{ir} \cos \theta_{ir} - a_{i+1,r} \cos \theta_{i+1,r})$,

$p_{ir} = (a_{ir} \sin \theta_{ir} - a_{i+1,r} \sin \theta_{i+1,r})$ 。

1.4 块系岩体能量传递与耗散理论分析

在摆型波传播过程中块系岩体的能量由动能和势能组成且任一时刻系统的能量为

$$W(t) = E_k(t) + E_p(t) \quad (20)$$

式中, $E_k(t)$ 和 $E_p(t)$ 分别可由式 (13)、(19) 求得。

由于岩块间的阻尼耗能作用, 则在摆型波传播过程中存在能量的耗散。整个块系岩体的能量耗散 W_D 可表示为

$$W_D = W_1 - (E_k + E_p) \quad (21)$$

其中, W_1 为初始冲击能量, W_D 即在整个时间历程上初始能量与实时能量的差值。

2 块系岩体能量传递计算分析

根据上面的理论分析结果, 下面通过计算分析, 块系岩体中摆型波传播时局部区域能量转化及整个块系岩体的能量传递与耗散规律。

2.1 块系岩体局部能量转化计算分析

通过计算分析摆型波传播过程块系岩体局部区域能量转化与传递。依据文献[22]选取计算参数, 其中岩块间的黏性阻尼 $c_i = 35 \text{ kg/s}$, 岩块间的弹性系数 $k_i = 6 \times 10^5 \text{ kg/s}^2$, 块体质量为 $m_i = 10 \text{ kg}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。令 $n = 20$ 即由 20 个岩块组成的块系岩体。若初始冲击能量 $W_1 = 500 \text{ J}$, 则可得初始岩块的冲击扰动速度为 $\dot{x}_1(0) = 10 \text{ m/s}$ 。对块系岩体的局部区域进行定义, 定义局部区域单元 i 为, 由块体 i 及块体 i 和块体 $i+1$ 之间的软弱连接部分组成的局部区域介质。因此整个块系岩体由 20 个局部区域单元组成。在每个局部区域单元中的能量转化为, 岩块的动能和岩块间软弱介质弹性势能之间的转化, 则由式 (6)、(16) 可知第 4 单元内的动能和势能变化如图 4。

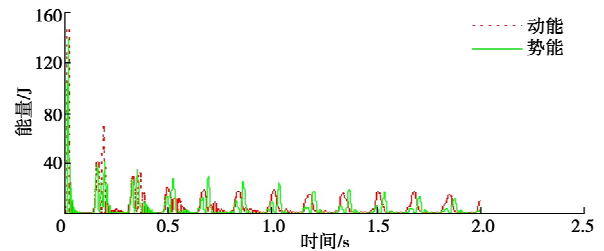


图 4 第 4 单元内的动能和势能

Fig. 4 Kinetic energy and elastic potential energy in unit 4

由图 4 可知, 在第 4 个区域单元内动能和势能均呈现周期性衰减。在扰动开始时动能大于势能, 传递过程中动能补给势能, 此时岩块的动能促使岩块间软弱介质发生变形转化为势能, 但在 1 s 后动能和势能的峰值几乎相当并逐渐耗散掉。在整个时间历程上动能迅速衰减但势能相对衰减较慢, 局部区域单元内的运动形式表现为, 块体推动着岩块间的软弱介质发生变形及其相互转化过程。同时, 从图 4 可知岩块动能的最大值为 147.4 J, 岩块间软弱介质势能的最大值为 139.9 J。同样的, 在第 16 个区域单元内的动能和势能变化, 如图 5。

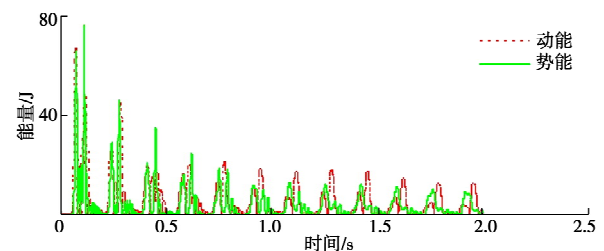


图 5 第 16 单元内的动能和势能

Fig. 5 Kinetic energy and elastic potential energy in unit 16

由图 5 可知, 在第 16 个区域单元内动能和势能同样具有周期衰减特性, 在扰动开始时势能大于动能, 传递过程中势能补给动能, 此时岩块间软弱介质的变形会推动着岩块的运动, 随着时间的推移势能迅速衰减但动能衰减相对较慢, 单元内的运动形式表现为岩块的摆动。同时, 从图 5 可知岩块动能的最大值为 67.5 J, 岩块间软弱介质势能的最大值为 76.6 J。

因此, 在摆型波传播过程中冲击能量在块系岩体的初始区域耗散较快, 同时动能补给势能, 能量耗散以动能为主, 在末端区域能量耗散较慢且势能补给动能, 能量耗散以势能耗散为主。

2.2 块系岩体系统能量传递计算分析

在块系岩体摆型波传播过程中, 岩块的动能和块体间软弱介质的势能均呈现周期衰减特征, 同时从式 (13)、(19) 所表示的整个块系岩体的动能和势能变化可以得到整个块系岩体系统动能和势能变化的周期最值分布特征。由式 (13) 可知动能的周期最大值时刻分布为

$$\omega_r t + \theta_{ir} - \theta'_{ir} = k\pi \quad (k = 2n \text{ 或 } k = 2n + 1, n \in N)。(22)$$

动能的周期最小值时刻分布为

$$\omega_r t + \theta_{ir} - \theta'_{ir} = k\pi + \frac{\pi}{2} \quad (k \in N)。(23)$$

同理, 由式 (19) 可知, 势能的周期最大值时刻分布为

$$\omega_r t + \theta''_{ir} = k\pi \quad (k = 2n \text{ 或 } k = 2n + 1, n \in N)。(24)$$

势能的周期最小值时刻分布为

$$\omega_r t + \theta''_{ir} = k\pi + \frac{\pi}{2} \quad (k \in N)。(25)$$

由式 (13)、(19) 可以计算整个块系岩体系统的动能和势能变化如图 6 所示。

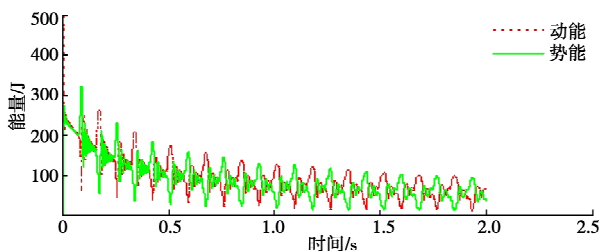


图 6 块系岩体系统动能和势能

Fig. 6 Kinetic energy and elastic potential energy of block-rock mass system

图 6 表明块系岩体中的动能和势能相互转化, 势能最小则动能最大, 势能最大则动能最小, 动能和势能具有相同的指数衰减规律。同时由图 6 可知, 在前 2 s 内整个块系岩体的动能最大值为 500.0 J, 最小值为 11.2 J; 势能最大值为 322.0 J, 最小值为 12.6 J。进一步由式 (21) 可知, 整个块系岩体的系统能量与耗散如图 7 所示。

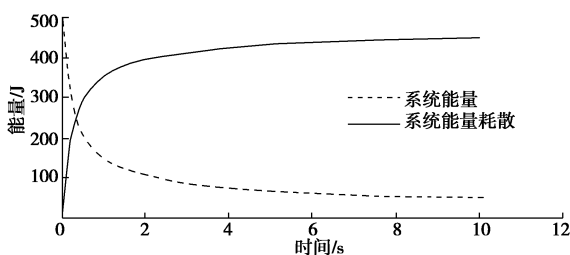


图 7 系统能量与能量耗散

Fig. 7 System energy and energy dissipation

由图 7 可知, 整个块系岩体系统的能量最大值为 500.0 J 即初始扰动能量, 最小值为 47.6 J。前 1 s 是系统能量的主要耗散阶段且接近线性变化, 在 1~10 s 内能量耗散较为缓慢。同时, 在 1 s 末系统能量为 148.1 J, 在 10 s 末系统能量为 47.6 J, 用 $\Delta E / \Delta t$ 表示单位时间内块系岩体系统能量变化, 由此可知前 1 s 内系统能量变化率为 $\Delta E / \Delta t_1 = 351.9$, 前 10 s 内系统能量变化率为 $\Delta E / \Delta t_{10} = 45.2$ 。因此, 块系岩体系统能量耗散主要集中在很短的初始扰动时间内。

3 结 论

(1) 块系岩体摆型波传播过程岩体能量转化规律为, 岩块动能和块体间软弱连接介质势能之间的相互转化, 给出了块系岩体能量转化、传递与耗散的理论分析结果。

(2) 得到摆型波传播过程块系岩体的局部区域能量转化规律。在初始区域能量耗散较快, 同时动能补给势能, 能量耗散以动能为主, 在末端区域能量耗散较慢, 势能补给动能, 能量耗散以势能为主。

(3) 整个块系岩体的系统能量表现为动能和势能的周期转化并向前传递, 系统能量耗散满足指数变化规律且能量耗散主要集中在扰动经过后较短的时间内。

参考文献:

- [1] SADOVSKY M A. Natural lumpiness of rock[J]. Dokl Akad Nauk, 1979, **247**(4): 21 - 29.
- [2] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I. On formation of elastic wave packages under impulse excitation of block media[J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1993, **333**(4): 1 - 7.
- [3] KURLENYA M V, OPARIN V N, OSTRIKOV V I. Pendulum type waves, part I. State of the problem and measuring instrument and computer complex[J]. Journal of Mining Science, 1996, **32**(3): 159 - 163.
- [4] KURLENYA M V, OPARIN V N, OSTRIKOV V I. Geomechanics, problems of nonlinear geomechanics part II[J]. Journal of Mining Science, 1999, **36**(4): 12 - 16.
- [5] KURLENYA M V, OPARIN V N, OSTRIKOV V I. Rock mechanics. Geomechanical conditions for quasi-resonances in geomaterials and block media[J]. Journal of Mining Science, 1998, **34**(5): 379 - 386.
- [6] KURLENYA M V, OPARIN V N. Geomechanics, problems of nonlinear geomechanics part II[J]. Journal of Mining Science, 2000, **36**(4): 305 - 326.
- [7] ALEKSANDROVA N I, CHERNIKOV A G, SHER E N. Experimental investigation into the one-dimensional calculated model of wave propagation in block medium[J]. Journal of Mining Science, 2005, **41**(3): 232 - 239.
- [8] ALEKSANDROVA N I, SHER E N. Modeling of wave propagation in block media[J]. Journal of Mining Science, 2004, **40**(6): 579 - 587.
- [9] ALEKSANDROVA N I. Elastic wave propagation in block medium under impulse loading[J]. Journal of Mining Science,

- 2003, **39**(6): 556 – 564.
- [10] ALEKSANDROVA N I, CHERNIKOV A G, SHER E N. On attenuation of pendulum type waves in block rock mass[J]. Journal of Mining Science, 2004, **42**(5): 468 – 475.
- [11] SLEPYAN L I. Nonstationary elastic waves[M]. Leningrad: Sudostroenie, 1972. (in Russian)
- [12] SLEPYAN L I, YAKOCLEV Yu S. Integral transformations in nonstationary problems of mechanics[M]. Leningrad: Sudostroenie, 1980. (in Russian)
- [13] ALEKSANDROVA N I. Elastic wave propagation in block medium under impulse loading[J]. Journal of Mining Science, 2003, **39**(6): 556 – 564.
- [14] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[R]. 南京: 解放军理工大学, 2004. (QIAN Qi-hu. The key scientific problems of deep underground space development[R]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [15] 王明洋, 戚承志, 钱七虎. 深部岩体块系介质变形与运动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2825 – 2830. (WANG Ming-yang, QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu. Study on deformation and motion characteristics of blocks in deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2825 – 2830. (in Chinese))
- [16] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 448 – 455. (WANG Ming-yang, ZHOU Ze-ping, QIAN Qi-hu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 448 – 455. (in Chinese))
- [17] 王德荣, 陆渝生, 冯淑芳, 等. 深部岩体动态特性多功能试验系统的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 601 – 606. (WANG De-rong, LU Yu-sheng, FENG Shu-fang, et al. Development of multipurpose test system for dynamic behaviors of deep rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 601 – 606. (in Chinese))
- [18] 戚承志, 钱七虎, 王明洋, 等. 岩体的构造层次及其成因[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2838 – 2846. (QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang, et al. Structural hierarchy of rock massif and mechanism of its formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2838 – 2846. (in Chinese))
- [19] 吴昊, 方秦, 于冬勋. 深部块系岩体摆型波现象的研究进展[J]. 力学进展, 2008, **38**(5): 601 – 609. (WU Hao, FANG Qin, YU Dong-xun. Advances in the study on pendulum-type wave phenomenon in the deep block rock mass[J]. Advances in Mechanics, 2008, **38**(5): 601 – 609. (in Chinese))
- [20] 潘一山, 王凯兴, 肖永惠. 基于摆型波理论的防冲支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1537 – 1543. (PAN Yi-shan, WANG Kai-xing, XIAO Yong-hui. Design of anti-scour support based on theory of pendulum-type wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1537 – 1543. (in Chinese))
- [21] 潘一山, 王凯兴. 岩块尺度对摆型波传播影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 2): 3459 – 3465. (PAN Yi-shan, WANG Kai-xing. Study effect of block-rock scale on pendulum-typewave propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3459 – 3465. (in Chinese))
- [22] ALEKSANDROVA N I, SHER E N, CHERNIKOV A G. Effect of viscosity of partings in block-hierarchical media on propagation of low-frequency pendulum waves[J]. Journal of Mining Science, 2008, **44**(3): 225 – 234.
- [23] KURLENYA M V, OPARIN V N, OSTRIKOV V I. Geomechanical conditions for quasi-resonances in geomaterials and block media[J]. Journal of Mining Science, 1998, **34**(5): 379 – 386.