

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0191

深部岩体变形破坏的特征能量因子与应用*

陈昊祥, 王明洋, 李 杰

(陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 深部岩体在高地应力作用下储存了大量的弹性应变能。在开挖或爆破扰动作用下, 原有的平衡状态被打破, 围岩中形成了有势场和不平衡应力场。在不平衡力场和扰动场的共同作用下, 岩体的变形与破坏表现出了诸如分区破裂化、大变形、岩爆以及人工地震等非线性行为。传统的连续介质理论并不能考虑岩体的构造特性与含能特性, 因此无法很好地解释深部岩体的特殊非线性力学现象。特征能量因子从能量的角度出发, 结合统计物理学观点, 为分析深部岩体在动静荷载组合作用下的变形和破坏过程提供了有效的理论支撑。本文主要对特征能量因子进行了简要介绍, 并回顾了其在深部岩体分区破裂以及动力诱发围岩不可逆变形等非线性工程灾害现象中的应用。

关键词: 深部岩体; 构造层级; 含能特性; 有势场与扰动场; 工程灾害

中图分类号: O383; TU45 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

随着国民经济的快速发展, 地表资源的开发和利用已趋于饱和, 而对于深部地下空间及矿产资源的需求则日益加剧^[1-2]。为了缓解交通与人员拥堵以及汽车尾气的污染, 各大城市相继建设了大批的地铁、地下物流线路、综合管廊以及地下商场等设施; “八纵八横” 国家铁路网络构想, 催生了大量深长及跨江越海隧道的设计和建设; 在国家战略能源安全方面, 为了应对地表及浅层能源日趋枯竭的现状, 大规模的深部资源开发已经成为我国采矿工业发展的必然趋势。同时, 为了防止国际原油和天然气价格波动以及地缘政治动荡对我国能源安全的威胁, 建立合理的能源地下储备体系也至关重要; 近年来, 高精尖战术型钻地核武器的连续呈现^[3-6], 打破了当前世界的核平衡, 对我国地下防护工程的安全形成了严峻的考验。为了更好地应对上述问题, 需要将发展的希望和眼光寄托于深地下空间和资源的开发利用。

岩体作为天然地质材料, 具有复杂的内部构造^[7-10], 这造成了岩体材料的非连续性、非均匀性以及力学性质的离散性。在外力场的作用下, 岩体内部物质点的变形与应力分布复杂而紊乱, 通常伴随应力集中、应变局部化以及非协调变形等。此时, 岩体表现出了多尺度、多层次的破坏行为。

深部岩体赋存在高应力环境中, 储存了大量的弹性应变能。在开挖卸荷扰动或爆炸扰动作用下, 形成了深部岩体“一高两扰动”特殊的受力状态。因此, 深部岩体表现出了迥异于浅部岩体的含能特性以及变形破坏模式, 诸如分区破裂化、大变形、岩爆以及人工地震等非线性科学现象^[11-17], 由此带来的灾害防控问题亟待理论与技术支撑。

深部岩体的层次构造以及含能特点导致了其变形破坏特征具有加卸载耦合、动静变形叠加、时空变化相关、破坏状态剧烈等特点。通过传统的连续介质和损伤断裂理论建立材料中物质点应力与变形之间的关系理论上可行, 但由于材料内部的构造特征以及不可计数的边界条件, 使得实际执行起来困难异常。特征能量因子从统计物理角度出发, 利用能量可加性, 找出了将介质复杂运动转化为有序平均运动的规律, 为揭示深部岩体复杂科学现象规律、找到灾变发生条件与创新防控技术提供了可靠的理论方法。

* 收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-06-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB036005); 国家自然科学基金(51527810, 51679249)

第一作者: 陈昊祥(1992—), 男, 博士, chx@stu.bucea.edu.cn;

通信作者: 王明洋(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, wmyrf@163.com。

1 深部岩体的构造与含能特性

岩体的变形和破坏主要表现为宏观力学特性的变化,而岩体的宏观力学特性主要由应力水平(即含能特性)与内部构造层次决定。因此为了探究岩体材料的特性,需要进一步了解深部岩体材料的含能特性与内部的构造层次。

1.1 深部岩体的结构层次

长久以来,材料物理学家及力学家想通过研究材料的微观特性来确定材料的宏观特性,但众多的尝试都以失败而告终。起初人们认为失败的原因是描述材料变形破坏数学手段的复杂性造成的,但是后来逐渐清晰的是失败的原因一方面是我们对于材料变形的认识不正确;另一方面是材料内部包含着众多的结构层次^[18]。

Sadovsky 等^[7, 19]提出了岩体构造层次的概念,认为岩体具有嵌入特性,小的部分嵌入在大的部分中,而后者则又嵌入到更大的部分中,如此重复形成了完整的嵌入系统,如图1所示为不同等级断层形成模式。

在此嵌入系统内,岩体的尺寸通常满足一定的自相似规律

$$A_i = (\sqrt{2})^i A_0 \quad (1)$$

式中: $A_0 = 2.5 \times 10^6 \text{ m}$ 为地核直径; i 为负整数。

式(1)通过指数 i 降阶可知,岩体存在的特征尺寸包含了从地质构造级别一直到微晶体级别的各个层级,因此岩体材料表现出了显著的离散性和非均匀性。

传统的连续介质力学通常选取微分单元进行分析,而微分单元的尺寸 l 则须满足 $\lambda \ll l \ll l_0$, 其中, λ 为介质的内部特征尺度, l_0 为研究物体的宏观尺度。由于岩体构造体系包含了研究范围内的任意尺度,即研究选取的微分单元也具有构造特性,因此不论选取何种尺度的微分单元都能找到与之对应的构造层级,使得连续介质理论得到的结果存在与之同阶的计算误差^[8, 21]。由于上述的不均匀性和离散性,岩体材料的力学性能表现出对材料尺度的依赖性,但经典的连续介质理论并不包含有关长度的参数,因此试图通过选取合适的微分单元尺度来克服岩体离散特性的做法是行不通的。另外,连续介质理论还忽略了岩体构造过程中的另一特征—含能特性。

1.2 深部岩体的含能特性

岩石作为大颗粒介质,其强度主要依赖于颗粒间的摩擦力,表现出了显著的内摩擦特性^[22],再加上岩体所处的高地应力环境,使得岩体内部储存了大量的应变能。关于岩体的含能特性,具体可通过下列现场和实验现象进一步说明^[23]。

(1) 一定深度围岩钻孔取芯得到的岩样经历轴向卸载一段时间后,岩样会沿轴向出现等间距断裂,此现象称为岩芯饼化^[24-25]。岩芯饼化发生条件以及饼化厚度受初始地应力(即岩芯储存的初始应变能)和卸荷速率(能量释放率)等因素影响。

(2) 在不受任何外部作用,深部岩体取样后会自发地快速崩解。如果在岩样表面进行轻微扰动(敲击或刻痕)会加速岩样的破坏过程。这表明岩样中储存了大量的应变能,而外部扰动则会加速岩样中储存能量的释放速率^[26]。

(3) 地下硐室开挖后,经过几年甚至十几年后硐室围岩仍会产生裂纹甚至发生破坏,而爆破和开挖扰动产生的影响通常不会持续如此长的时间,因此造成围岩开裂与破坏的主要原因在于岩体内部存储能量的释放。

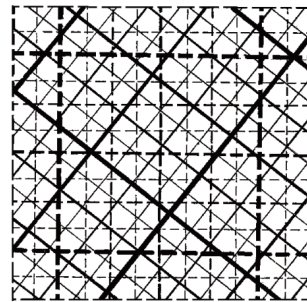


图1 不同等级断层形成模式示意图^[20]

Fig. 1 Fault formation pattern of different scale levels^[20]

(4) 地下爆炸诱发大规模地震, 1989 年俄罗斯阿帕吉特矿山中使用 230 t 炸药爆破, 并诱发矿区发生地震。此时炸药释放的能量约为 10^8 J, 而地震释放的能量则约为 10^{12} J, 远大于爆炸释放的能量^[27]。表明地震释放的能量主要来源于围岩中储存的应变能。

由上述现象可知, 岩体含能情况存在如下特性^[28-29]: (1) 岩体作为内摩擦材料, 在高地应力作用下储存了大量的应变能; (2) 深部岩体取样后, 此时岩样处于准平衡状态, 随着岩样中储存能量的缓慢释放, 岩样将发生变形甚至破坏; (3) 微扰动会打破岩样的准平衡状态, 往往起着解除约束的作用, 此时岩样释放出的能量要远大于微扰动输入的能量; (4) 微扰动仅加速了能量释放速率以及岩体变形破坏的进程, 并不会降低岩样变形破坏所对应的能量阈值。

2 深部岩体中的有势场

深部巷道开挖前, 岩体在高地应力作用下储存了大量的弹性应变能, 此时岩体中的应力场与能量场处于平衡状态。开挖过程中部分高储能岩体被移除, 导致原有的平衡状态被打破, 开挖边界上形成了有势场和不平衡的应力场。

开挖一半径为 a 的圆形洞室, 边界 $r=a$ 处不平衡应力场的强度等于围岩压力, 而围岩压力 $\sigma_r|_{r=a}$ 的物理本质为初始地应力 σ_0 与围岩自承能力 $R(u_r|_{r=a})$ 之差, 即 $\sigma_r|_{r=a} = \sigma_0 - R(u_r|_{r=a})$, 其中围岩自承担应力 $R(u_r|_{r=a})$ 为边界位移 $u_r|_{r=a}$ 的函数。此时, 开挖边界汇集的能量 W_s 将通过围岩压力做功释放并转化为围岩的动能:

$$W_s = \int_0^{u_r|_{r=a}} S \sigma_r|_{r=a} du_r|_{r=a} \quad (2)$$

式中: S 为洞室侧表面积。

对于圆形巷道, 围岩仅能沿半径方向单向运动, 故围岩压力可看作一标量场, 此时围岩压力的势函数为:

$$\psi = - \int_0^{u_r|_{r=a}} \sigma_r|_{r=a} du_r|_{r=a} \quad (3)$$

势能为:

$$W_p = S\psi = - \int_0^{u_r|_{r=a}} S \sigma_r|_{r=a} du_r|_{r=a} \quad (4)$$

由式(2)和(4)可知, 开挖边界汇聚的不平衡势能等于围岩压力做功, 及 $|W_s| = |W_p|$, 表明不平衡势能将通过围岩压力做功向外释放。

在有势场的作用下, 岩块中各物质点以及岩块之间将发生变形和运动。由于场的传播具有一定的速度, 故围岩的变形和运动需要经历一段时间, 并不会瞬间完成。高地应力并未改变岩体的变形机制, 仅是增加了变形梯度(加快了变形速率, 增加了破坏范围)。因此, 如何考虑扰动场对于岩体变形和运动的影响就成为了解决深部岩体“一高两扰动”问题的关键。

3 有势场与扰动场的相互作用

深部岩体力学的本质在于确定“一高两扰动”特殊受力条件下岩体的变形与运动, 此时岩体的运动 $x(t)$ 可以分解为平稳运动 $X(t)$ 和微振动 $\xi(t)$ 的叠加。岩体的平稳运动由缓慢变化的有势场引起, 而微振动则由高频振动的扰动场引起。通过平均化的方法将扰动场引起的微振动转化为平稳运动, 消除了与微振动有关的快运动, 以突出系统的平稳运动。此时可将扰动场转化为等效势能场, 然后根据能量的可加性原理叠加到原有的势能场之上。这种处理方法, 可为研究岩体在有势场与扰动场共同作用下的力学特性提供有力的理论基础^[30-32]。

为了便于说明, 本文中以单自由度质点为例: 假设一单自由度质点在定常有势场 U 的作用下做平稳运动, 同时还受到一个高频扰动力场作用, 其表达式为:

$$f = f_1 \cos(\omega t) + f_2 \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中: f 为高频扰动力场; f_1 和 f_2 为扰动力中不同组分对应的幅值, 且为空间坐标的函数; ω 为扰动力场的作用频率, 且频率 $\omega \gg 1/T$, T 为有势场 U 作用下平稳运动的周期。

对于空间坐标为 x 的单自由度体系, 质点运动方程为:

$$m\ddot{x} = -\frac{dU}{dx} + f \quad (6)$$

式中: m 为质点的质量。此时, 质点的真实位移 x 可分解为平稳运动位移 X 与围绕其的微小幅振动位移 ξ 之和, 即:

$$x(t) = X(t) + \xi(t) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 并对时间取平均可得^[32]:

$$m\ddot{X} = -\frac{dU_{\text{eff}}}{dX} \quad (8)$$

式中: U_{eff} 为等效势能。且:

$$U_{\text{eff}} = U + \frac{1}{4m\omega^2} (f_1^2 + f_2^2) \quad (9)$$

此时, 扰动场微振动的等效平均动能为:

$$\frac{1}{2} m \overline{\xi^2} = \frac{1}{4m\omega^2} (f_1^2 + f_2^2) \quad (10)$$

由式(10)可知, 对小幅振动取平均后, 相当于在原有的(准)定常场 U 之上额外叠加了另一个(准)定常场, 此附加场即为微振动动能的平均值, 其强度则依赖于扰动力场幅值的平方。由功能关系可知, 有势场 U 与扰动场的等效势能最终将转换为质点的动能, 及 $E=U_{\text{eff}}$ (E 为质点的动能)。

4 特征能量因子

Kurlenya 等^[30] 对大量地震、岩爆以及不同能量等级的深地下爆炸试验中能量和摆型波载体(地质块体)尺寸之间的关系进行了研究, 总结了深部岩体出现准共振和摆型波现象的能量条件:

$$k = \frac{W}{M_b c_p^2} \quad (11)$$

式中: W 为作用于岩体上外力所输入的功(即块体包含的动能), M_b 为地质块体的质量, c_p 为完整岩石中的纵波速度。此时, $M_b c_p^2$ 的物理意义为地质块体所包含的静能量。

块体在扰动力作用下波动特性试验如图 2 所示。当 $k \geq (1 \sim 4) \times 10^{-11}$ 时, 岩石块体间将产生摆型波; 当 $k \geq (1 \sim 4) \times 10^{-9}$ 时, 整个岩石块系将进入准共振状态, 此时岩块之间将相对脱离, 导致岩块间的正应力减小, 从而引起岩块间的摩擦力减小甚至消失, 即超低摩擦现象。

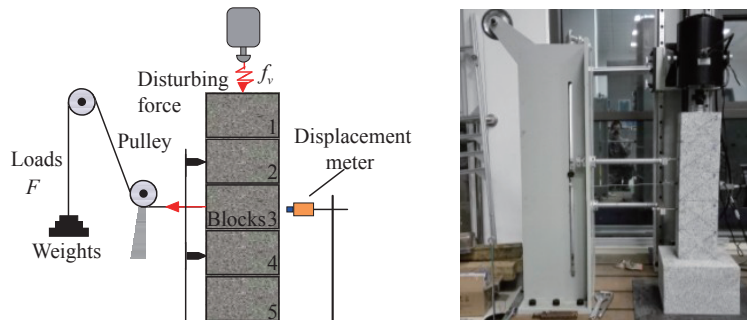


图 2 一维岩块体系摆型波试验实验示意图^[31]

Fig. 2 Illustration of one-dimensional rock blocks ship test^[31]

受到冲击因子的启发, 王明洋等^[34]发现式(11)中块体质量 M_b 包含了岩体破坏时的所有特征信息, 于是将 k 定义为特征能量因子, 并率先将特征能量因子应用到了深部岩体力学领域, 对深部岩体的特殊力学现象进行了探讨, 为理论研究岩体动静荷载组合作用下的变形和破坏机理提供了新的可能性。

质点在有势场作用下稳定运动所对应的动能以及微扰动所对应的等效动能分别为:

$$W_s = \frac{1}{2} m \dot{X}^2 \quad (12)$$

$$W_\xi = \frac{1}{2} m \overline{\xi^2} \quad (13)$$

由特征能量因子的定义可知, 质点稳定运动和微扰动所对应的特征能量因子分别为:

$$k_s = \frac{W_s}{mc_p^2} = \frac{1}{2} \frac{\dot{X}^2}{c_p^2} = \frac{\bar{\varepsilon}_0^2}{2}, \quad k_\xi = \frac{W_\xi}{mc_p^2} = \frac{1}{2} \frac{\overline{\xi^2}}{c_p^2} = \frac{\bar{\varepsilon}_\xi^2}{2} \quad (14)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_0 = \dot{X}/c_p$ 为稳定运动的平均应变, $\bar{\varepsilon}_\xi = \xi/c_p$ 为微振动的平均应变。

岩体在动静荷载组合作用下对应的特征能量因子为:

$$k = \frac{W}{mc_p^2} = \frac{U_{\text{eff}}}{mc_p^2} = k_s + k_\xi = \frac{\bar{\varepsilon}_0^2 + \bar{\varepsilon}_\xi^2}{2} \quad (15)$$

在有势场和微扰动的共同作用下岩体处于动态平衡; 当微扰动输入的能量与围岩储存的能量达到某一阈值时岩体将发生破坏, 且破坏程度与能量释放的大小和速率有关; 微扰动会加速岩体的破坏过程, 但不会降低破坏所需的能量阈值; 微扰动仅起到“扣扳机”的作用。

5 特征能量因子的工程应用

5.1 深部巷道围岩分区破裂

深部圆形巷道开挖过程中, 在扰动场和有势场共同作用下围岩将沿径向朝巷道中心运动, 如图 3 所示。

此时, 圆形巷道围岩的运动方程可化为

$$M \ddot{u}_r = -\frac{dU}{du_r} + f_r \quad (16)$$

式中: M 为开挖卸载影响范围内围岩的质量, 当围岩发生破坏后 $M = M_p$ 为塑性区围岩质量; U 为开挖边界上的有势场; u_r 为围岩的位移; f_r 为扰动荷载。此时, 开挖边界上的等效有势场 U_{eff} 将转化围岩的动能 W 。由式(15)可知, 此时巷道围岩对应的特征能量因子为

$$k = \frac{W}{M_p c_p^2} = \frac{1}{2} \frac{(\dot{u}_r|_{r=a})^2}{c_p^2} + \frac{1}{2} \frac{\overline{\xi^2}}{c_p^2} = k_s + k_\xi \quad (17)$$

深部卸荷作用在巷道边界上产生的高频扰动作用力的形式为^[32]:

$$f_r = -\sigma_0 S e^{-\beta r} \cos(\omega t) \quad (18)$$

式中: $S = 2\pi aL$ 为圆形洞室对应的侧表面积, L 为洞室长度, β 为衰减系数。由于衰减的频率与振动频率相比非常小, 因此取 $\beta = 0$ 。圆形洞室开挖形成的瞬间, 可得其振动频率:

$$\omega = \frac{c_p}{2a} \quad (19)$$

此时, 开挖扰动产生的附加能量场为:

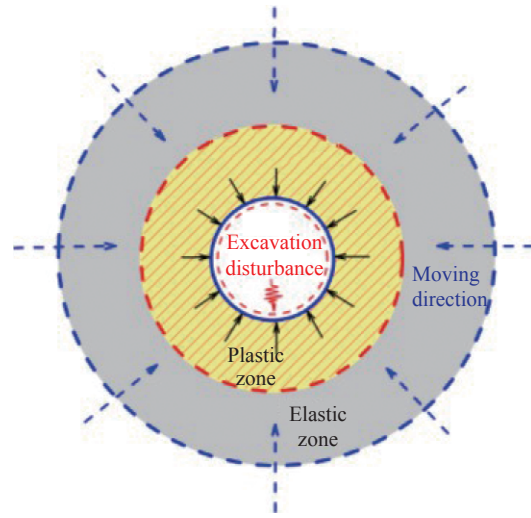


图 3 围岩在准定常场与扰动场共同作用下的运动
Fig. 3 Motion of surrounding rocks under combined effect of quasi-stable and disturbing fields

$$W_{\xi} = \frac{1}{2} M_p \bar{\xi}^2 = \frac{\sigma_0^2 S^2}{4 M_p \omega^2} \tag{20}$$

对于圆形洞室, 塑性区围岩质量 $M_p = \rho L \pi (r_p^2 - a^2)$, 其中 ρ 为围岩密度, r_p 为塑性区半径。

开挖扰动产生的荷载频率 ω 远大于不平衡场的频率 ω_0 , 因此 k_s 可以忽略不计, 于是式(17)可化为:

$$k = k_s + k_{\xi} \approx k_{\xi} = \frac{\sigma_0^2 S^2}{4 M_p^2 c_p^2 \omega^2} \tag{21}$$

对式(21)进行化简, 可得塑性区半径 r_p 与特征能量因子 k_{ξ} 的关系:

$$\frac{r_p}{a} \approx \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho c_p^2} \frac{2}{\sqrt{k_{\xi}}} + 1} = \sqrt{\frac{\sigma_0 \tau_s}{\tau_s \mu} \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{2}{\sqrt{k_{\xi}}} + 1} \tag{22}$$

当围岩参数选取如下^[32]: $\rho = 2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\tau_s = 15 \text{ MPa}$, $\nu = 0.25$, $\tau_s/\mu = 1.5 \times 10^{-3}$, $\tau_c/\tau_s = 1/2 \sim 2/3$ 。由文献 [32] 可知, 圆形巷道最大弹性回弹和弹塑性能量因子阈值 k_0 分别约为 3.75×10^{-9} 和 $(3.75 \sim 5) \times 10^{-7}$ 。

当 $k_0 = (3.75 \sim 5) \times 10^{-7}$ 时, 可得分区破裂的第 1 圈半径; 当 $k_0 = 3.75 \times 10^{-9}$ 时, 围岩将处于稳定状态, 此时可得分区破裂对应的最远圈半径。由于岩石塑性状态下的耗散机理尚不明确, 因此很难确定围岩分区破裂中间破碎区的半径。图 4 所示分区破裂半径计算与监测对比结果表明, 开挖过程中扰动能量在由洞室边界向内部岩体传递时, 能量等级依次递减。

5.2 地下核爆炸诱发远区不可逆位移计算

地下爆炸在距离爆心很远的地下洞室围岩会受到爆炸扰动荷载影响并发生工程性地震, 导致围岩出现不可逆变形。前苏联的地下核试验数据表明围岩出现不可逆范围通常为 $r_d/Q^{1/3} = (650 \sim 1400) \text{ m/kt}^{1/3}$, 而连续介质力学解得范围则通常为 $r_d/Q^{1/3} = (80 \sim 120) \text{ m/kt}^{1/3}$ 远远小于实验结果, 其中 r_d 为不可逆变形区半径, Q 为爆炸当量。

连续介质力学模型计算结果远离实测结果的主要原因在于没有考虑岩体作为地质体的非连续构造的块体性, 岩体间软弱夹层的变形以及由块体性所导致的附加自由度; 另一个物理原因则是忽略了岩体作为地质体的另一个构造变形特性即岩体的含能特性, 由于地质构造作用和重力作用引起的变形, 积累了变形能。爆炸解除了岩体的约束, 变形能得到了释放, 并转变为岩体的动能, 使得岩体获得更大的运动和位移。因此连续介质力学在研究围岩工程性地震效应时存在着天然缺陷, 本节将通过能量因子对爆炸扰动诱发远区围岩不可逆位移进行介绍。

假设围岩中块体为立方体且各块体尺寸相同, 其排列如图 5 所示。取其中一个块体作为研究对象, 此时块体质量 $m = \rho_0 l^3$, 其中 ρ_0 和 l 分别为块体密度和尺寸。对于地下爆炸引起的冲击波形式通常为:

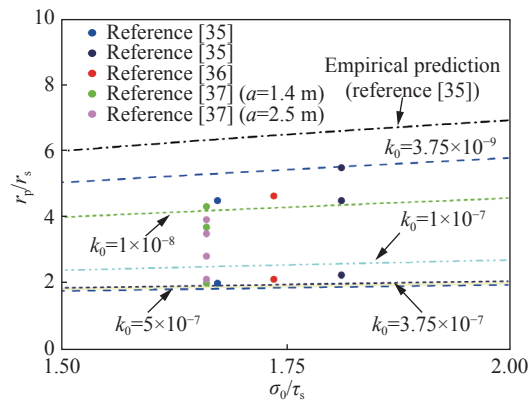


图 4 分区破裂半径计算与监测结果对比图^[35-37]
 Fig. 4 Comparison between prediction by formula and in-situ observation^[35-37]

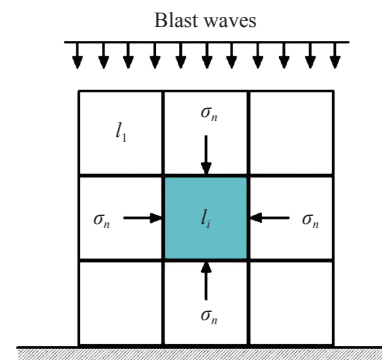


图 5 地下爆炸扰动荷载下围岩块体示意图
 Fig. 5 Motion of rock blocks under explosion disturbance

$$v(r, t) = \begin{cases} 0 & t < 0, t > t_c \\ v_0(r) \sin\left(\frac{\pi t}{t_c}\right) & 0 \leq t \leq t_c \end{cases} \quad (23)$$

式中: $v_0(r) = A(r/Q^{1/3})^{-n}$ 为距离爆心 r 处最大粒子速度, $\omega = \pi/t_c$ 为冲击波的振动频率, $t_c = BQ^{1/3}(r/Q^{1/3})^m/c_p$ 为扰动荷载作用时间, A 、 B 、 m 、 n 为实验参数。

此时, 爆炸产生的附加能量场为:

$$W_\xi = \frac{1}{2} m \bar{\dot{\xi}}^2 = \frac{f_1^2}{4m\omega^2} = \frac{(\chi \rho_0 l^2 c_p v_0 t_c)^2}{4\rho_0 l^3 \pi^2} \quad (24)$$

式中: χ 为形状系数, 对于立方体 $\chi=4$ 。冲击波引起的位移为:

$$u = \int_0^{t_c} v_0 \sin\left(\frac{\pi t}{t_c}\right) dt = \frac{2v_0 t_c}{\pi} = \frac{2ABQ^{1/3}}{\pi c_p} (r/Q^{1/3})^{m-n} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24)后, 岩块的特征能量因子可表示为:

$$k = \frac{W_\xi}{m c_p^2} = \left(\frac{u}{l}\right)^2 = \varepsilon^2 \quad (26)$$

由于地下爆炸激活岩体的变形主要集中在结构面上, 且 $\varepsilon = u/l \leq \varepsilon_*$ 时, 岩体不会发生不可逆变形。由潮汐运动以及地层构造运动可知^[33], ε_* 取值通常为 $(1 \sim 2) \times 10^{-5}$ 。由此可知诱发工程地震时对应的特征能量因子阈值为:

$$k_d = \varepsilon_*^2 = (1 \sim 4) \times 10^{-10} \quad (27)$$

此时, 不可逆位移区域边界粒子速度可化为:

$$v_d = c_p \sqrt{2k_d} \quad (28)$$

如果考虑 $\varepsilon_* = \sqrt{k_d} = u_d/l$, 式(25)可化为:

$$r_d/Q^{1/3} = \left(\frac{\pi l \varepsilon_* c_p}{2ABQ^{1/3}}\right)^{\frac{1}{m-n}} = \left(\frac{\pi l \sqrt{k_d} c_p}{2ABQ^{1/3}}\right)^{\frac{1}{m-n}} \quad (29)$$

式中: r_d 为不可逆位移区半径, u_d 为不可逆位移区域边界位移。对式(29)化简, 可得不可逆位移区半径与激活岩体尺度之间的关系:

$$l/Q^{1/3} = A' (r_d/Q^{1/3})^{m-n} \quad (30)$$

式中: $A' = 2AB/(\pi \varepsilon_* c_p)$ 。通过大量地下爆炸激活块体尺寸的场地实验数据^[34] 拟合可得式(30)中系数 $A' = 0.105$, $m-n = 1.04$, 如图 6 所示即为实验数据点与拟合曲线之间的关系。

考虑不可逆位移区域边界粒子速度, 于是可得:

$$r_d/Q^{1/3} = (A'/c_p \sqrt{2k_d})^{1/n} \quad (31)$$

如表 1 所示为大量地下核爆炸试验数据中不同岩体系数 A 和 n 的统计值^[34]

结合式(31)与表 1 中不同岩体系数 A 和 n 的统计值, 可对地下核爆炸不可逆位移区范围进行评估, 结果如图 7 所示。

由图 7 与表 2 中地下核爆炸诱发不可逆位移数据可以看出, 当爆炸当量在百万吨量级时诱发

表 1 不同岩体中系数 A 和 n 的统计值

岩体	花岗岩	盐岩	凝灰岩
A	$(10 \sim 13) \times 10^3$	$(8 \sim 10) \times 10^3$	$(3 \sim 4) \times 10^3$
n	1.6~1.75	1.6	1.6

表 2 地下核爆炸不可逆位移实测数据^[34]

Table 2 Experimental results of irreversible deformation of underground explosion

核爆炸试验	岩性	当量/ kt	埋深/ m	不可逆位移 半径/(m·kt ^{-1/3})	k_d ($\times 10^{-10}$)
Greeley	凝灰岩	825	1 215	570	4.9
Duryea	流纹岩	65	547	239	8.0
Boxcar	凝灰岩	1 200	1 160	584	4.6
Benham	凝灰岩	1 100	1 400	1 260	1.6
Milrow	枕熔岩	1 000	1 219	809	1.6

的不可逆位移范围在 $600 \sim 1\,300 \text{ m/kt}^{1/3}$, 对应的特征能量因子阈值 $k_d \approx (1 \sim 4) \times 10^{-10}$, 与理论计算结果非常接近。当爆炸当量较小时, 爆炸冲击波作用较弱且影响范围较小, 不会诱发远区围岩发生不可逆位移, 因此理论结果与实验数据相差较远。

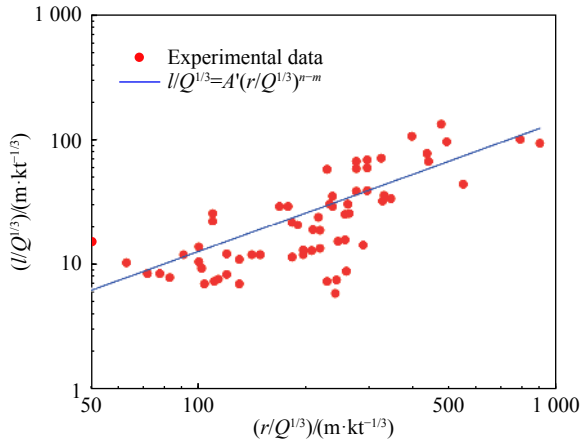


图 6 地下爆炸激活块体实验数据与理论拟合曲线

Fig. 6 Test results of rock size activated by large equivalent underground explosion

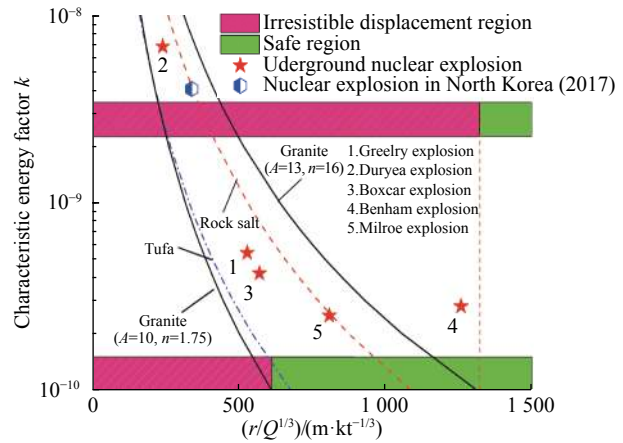


图 7 地下爆炸诱发不可逆位移区范围与实验结果对比

Fig. 7 Comparison of calculation results with experimental data of nuclear explosion

6 结 论

深部岩体在“一高两扰动”的特殊受力状态下, 其变形与破坏表现出了高度的非线性特征。本文主要讨论了深部岩体的构造层次、含能特性, 介绍了特征能量因子并分析了有势场与扰动场共同作用下深部岩体的运动特点, 回顾了特征能量因子在深部岩体分区破裂化以及动力诱发岩体不可逆位移等非线性力学现象中的应用, 主要结论如下:

(1) 围岩的运动可以分解为平稳运动和微振动的叠加, 岩体的平稳运动由缓慢变化的有势场引起, 而微振动则由高频振动的扰动场引起。通过平均化的方法将扰动场引起的微振动转化为平稳运动, 以突出系统的平稳运动。微振动取平均后, 可得微振动的等效势能, 此时扰动场相当于在原有的有势场之上额外叠加了一个有势场, 此附加场的强度则依赖于扰动力场幅值的平方。

(2) 由特征能量因子可知, 岩体在有势场和微扰动的共同作用下处于动态平衡状态; 当微扰动输入的能量与围岩储存的能量达到某一阈值时岩体将发生破坏, 破坏程度与能量释放的大小和速率有关; 微扰动会加速岩体的破坏过程, 但不会降低破坏所需的能量阈值; 微扰动仅起到“扣扳机”的作用。

(3) 采用特征能量因子分析了“动静”组合作用下深部圆形巷道分区破裂化以及地下核爆炸诱发远区围岩不可逆位移等工程灾害现象的物理力学机理。通过对比理论计算结果与实验和实测数据, 验证了理论方法的准确性。为理论研究岩体动静荷载组合作用下的变形和破坏机理提供了新的研究思路 and 可能性。

参考文献:

[1] 王梦恕. 21 世纪是隧道及地下空间发展的年代 [J]. *铁道建筑技术*, 2000, 1: 2-4. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2000.01.002.
WANG Mengshu. 21st century: the time for the great development of tunnels and underground space [J]. *Railway Construction Technology*, 2000, 1: 2-4. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2000.01.002.

[2] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题 [C] // 钱七虎院士论文选集. 北京: 科学出版社, 2007: 549-568.

- [3] 钱七虎, 任辉启. 深地下防护工程中的科学问题 [C] // 钱七虎院士论文选集. 北京: 科学出版社, 2007: 635–648.
- [4] 尼尔森 R W. 低当量钻地核武器 [J]. 杨凯旋, 译. 核武器与高技术, 2001(3): 1–7.
- [5] KRISTEN H M, NORRIS R S. The B61 family of nuclear bombs [J]. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2014, 70(3): 79–84. DOI: 10.1177/0096340214531546.
- [6] 钱七虎. 战略防护工程面临的核钻地弹威胁及连续介质力学模型的不适用性 [C] // 钱七虎院士论文选集. 北京: 科学出版社, 2007: 374–382.
- [7] SADOVSKY M A. Natural lumpiness of rocks [J]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1979, 247(4): 829–832.
- [8] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.005.
QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang, et al. Structural hierarchy of rock mass and mechanism of its formation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2838–2846. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.005.
- [9] 戚承志, 钱七虎, 王明洋. 岩体的构造层次粘性及动力强度 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(S1): 4679–4687.
QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang. The structural hierarchy viscosity and dynamic strength of rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(S1): 4679–4687.
- [10] CRISTESCU N D. New trends in rock mechanics [J]. *International Applied Mechanics*, 2002, 38(1): 1–22. DOI: 10.1023/A:1015364607665.
- [11] 陈宗基. 岩爆的工程实录、理论和控制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1987, 6(1): 1–18.
CHEN Zongji. Rockbursts, case records, theory and control [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1987, 6(1): 1–18.
- [12] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.03.002.
WANG Mingyang, ZHOU Zeping, QIAN Qihu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 448–455. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.03.002.
- [13] 钱七虎. 深部岩体工程相应的特征科学现象及“深部”的界定 [J]. *东华理工学院学报*, 2004, 27(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2004.01.001.
QIAN Qihu. The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness [J]. *Journal of East China University of Technology*, 2004, 27(1): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2004.01.001.
- [14] 钱七虎, 李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(6): 1278–1284. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.06.024.
QIAN Qihu, LI Shuchen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock mass engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1278–1284. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.06.024.
- [15] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of around underground workings: Part I: date of on-site observations [J]. *Journal of Mining Science*, 1986, 22(3): 157–168. DOI: 10.1007/BF02500863.
- [16] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I. Anomalously low friction in block media [J]. *Journal of Mining Science*, 1997, 33(1): 1–11. DOI: 10.1007/BF02765421.
- [17] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I. Effect of anomalously low friction in block media [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, 40(6): 1116–1120. DOI: 10.1007/BF02469182.
- [18] 陈昊祥. 深部巷道围岩分区破裂非线性连续模型的数值研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2016: 7–8.
- [19] SADOVSKY M A, VOLKHOVITINOV L G, PISARENKO V F. Deformation of a geophysical medium and the seismic process [M]. Moscow: Science Press, 1987: 5–14.
- [20] QI C, CHEN H, BAI J, et al. Viscosity of rock mass at different structural levels [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(2): 305–320. DOI: 10.1007/s11440-016-0449-5.
- [21] 戚承志, 钱七虎. 岩体动力变形与破坏的基本问题 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 182–183.
- [22] 钱七虎, 王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 101–124.
- [23] 李杰. 深部岩体卸荷力学机理及其本构模型 [D]. 南京: 解放军理工大学, 2012: 1–2.

- [24] 范鹏贤, 王明洋, 钱七虎. 深部非均匀岩体卸载拉裂的时间效应和主要影响因素 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(7): 1389–1396.
FAN Pengxian, WANG Mingyang, QI Qihu. Time effect and main influence factors of unloading splitting of deep-seated rock with non-uniformities [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(7): 1389–1396.
- [25] LIM S S, MARTIN C D. Core diskings and its relationship with stress magnitude for Lac du Bonnet granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(2): 254–264. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.11.007.
- [26] REVUZHENKO P. Mechanics of elastoplastic media and nonstandard analysis [M]. Novosibirsk: Izd NGU, 2000: 88–109.
- [27] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I. One approach to the prediction of rock bursts [J]. *Journal of Mining Science*, 1998: 647–650. DOI: 10.1007/BF02562390.
- [28] WANG Mi, LI J, MA L, et al. Study on the characteristic energy factor of the deep rock mass under weak disturbance [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 3165–3173. DOI: 10.1007/s00603-016-0968-2.
- [29] 王德荣, 李杰, 钱七虎. 深部地下空间周围岩体性能研究探讨 [J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(4): 542–546. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2006.04.005.
WANG Derong, LI Jie, QIAN Qihu. Study on characteristics of rock mass near deep underground space [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(4): 542–546. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2006.04.005.
- [30] KURLENYA M V, OPARIN V N. Problems of nonlinear geomechanics: Part II [J]. *Journal of Mining Science*, 2000, 36(4): 304–326. DOI: 10.1023/A:1026673105750.
- [31] 李杰, 蒋海明, 王明洋, 等. 爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题 (II): 冲击扰动诱发岩块滑移的物理模型试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 291–301. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0684.
LI Jie, JIANG Haiming, WANG Mingyang, et al. Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock: Part II: physical model test on sliding of rock blocks triggered by external disturbance [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 291–301. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0684.
- [32] 王明洋, 陈昊祥, 李杰, 等. 深部巷道分区破裂化计算理论与实测对比研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2209–2218. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0458.
WANG Mingyang, CHEN Haoxiang, LI Jie, et al. Theoretical research on zonal disintegration of rock masses around deep tunnels and comparisons with in-situ observations [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2209–2218. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0458.
- [33] KURLENYA M V, OPARIN V N. Problems of nonlinear geomechanics: Part I [J]. *Journal of Mining Science*, 1999, 35(3): 216–230. DOI: 10.1007/BF02550237.
- [34] 王明洋, 李杰. 爆炸与冲击的非线性岩石力学问题 III: 地下核爆炸诱发工程性地震效应的计算原理及应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(04): 695–707. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1078.
WANG Mingyang, LI Jie. Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock: Part III: the calculation principle of engineering seismic effects induced by underground nuclear explosion and underground protection [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(04): 695–707. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1078.
- [35] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of around underground workings: Part IV: practical applications [J]. *Journal of Mining Science*, 1989, 25(4): 297–302. DOI: 10.1007/BF02528546.
- [36] 方祖烈. 软岩巷道维护原理与控制措施 [C] // 何满潮. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 64–70.
FANG Zulie. Support principles for roadway in soft rock and its controlling measures [C] // HE Manchao. *Soft Rock Tunnel Support in Chinese Mines: Theory and Practice*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996: 64–70.
- [37] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂现象现场监测研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(8): 1545–1553.
LI Shucai, WANG Hanpeng, QIAN Qihu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8): 1545–1553.

A characteristic energy factor for deformation and failure of deep rock masses and its application

CHEN Haoxiang, WANG Mingyang, LI Jie

(*State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing, 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: As high elastic strain energy is stored in deep rock masses with high geo-stress, the initial equilibrium state in rock masses is broken as a result of excavation and explosion, thus forming the unbalanced force and energy field forms. The deformation and fracture of rock masses exhibit remarkable nonlinearity, such as zonal disintegration, large deformation, rockburst and artificial earthquake, under the combination of unbalanced force field and disturbance of dynamic loads, which leads to the special stress state for the deep rock masses. The classic continuum theory does not consider the natural discrete and energetic characteristics, and therefore cannot describe the nonlinear mechanical behavior of deep rock masses. Combining statistical physics, the characteristic energy factor provides a powerful theoretical proof for studying the deformation and fracture process of deep rock masses under the action of dynamic and static loading. In this paper, the characteristic energy factor is introduced briefly and its applications in engineering disasters such as zonal disintegration and irreversible deformation are reviewed.

Keywords: deep rock masses; structural hierarchies; energetic features; potential and disturbing fields; engineering disaster

(责任编辑 王易难)