深部非线性岩石动力学的理论发展及应用

李杰^{1,2*}, 王明洋^{1,2}, 陈昊祥¹, 徐天涵¹

1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007;

2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094

*联系人, E-mail: lijief@163.com

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-07-12; 网络出版日期: 2019-09-18

国家自然科学基金(编号: 51527810, 51679249)资助项目

摘要 本文系统总结了爆炸等强动力作用下深部非线性岩石动力学的发展, 指出在研究诱发人工地震、岩爆等动力事件时, 必须考虑岩体的结构特性. 通过大规模爆炸条件下的岩块基本变形特性分析, 构建了岩块不可逆位移渐进演化分析模型, 确定了不同爆炸当量激活块体的尺度随爆心距的关系和岩块不可逆位移大小的边界范围, 提出了地下核爆炸诱发人工地震安全距离的计算方法, 结合美、俄、法等地下核试验数据, 综合验证了理论方法的可靠性.

关键词 块系岩体, 爆炸后效应, 人工地震

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

1 引言

蓬勃发展的矿山、交通、水利水电等行业促进了岩石力学的发展. 20世纪之前, 岩体通常被理解为各向同性的连续体, 并采用连续介质力学描述岩体的应力应变状态及岩体变形的静、动力学过程. 然而, 不断发展的工程实践及实验却发现了许多背离连续介质力学理论和规律的事实, 必须考虑岩体的复杂结构^[1,2]. 如20世纪80–90年代, 俄罗斯岩石圈动力学研究所(Institute of Geosphere Dynamics)和施密特地球物理研究所(Schmidt's Institute of Physics of the Earth)的研究人员针对不同当量爆炸的后效效应开展了大量的试验研究, 试验工作涵盖了从采矿地下爆炸到地下核爆炸的

多种情况, 这些试验成功揭示了动力冲击下岩体的“变号”反应^[3–7], 即爆炸波传播过程中激发的地质块体相对于彼此的位移符号相反振动响应. 该现象是在不同层次的块体转动和平移受限的情况下发生的, 受爆炸空腔尺寸、地层应力和爆炸能量的支配. 并由此假设岩体中存在一种非线性弹性摆型波^[8,9], 这种“波”的载体是地质环境中的真实的结构性单元. 目前, 俄罗斯科学院西伯利亚分院及国内陆军工程大学^[10,11]和辽宁工程技术大学^[12]等单位正在通过综合科研项目开展对摆型波的理论 and 试验研究. 摆型波波速很小, 通常比岩体中纵波速度低2–6个数量级, 因而又称之为慢波. 学者们在不同的尺度上通过间接测量地球物理场的变化发现了这种波, 如俄罗斯科学家在Tashtagol矿山大当

引用格式: 李杰, 王明洋, 陈昊祥, 等. 深部非线性岩石动力学的理论发展及应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 024604

Li J, Wang M Y, Chen H X, et al. The theory development and application of deep nonlinear dynamic rock mechanics (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 024604, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0190](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0190)

量爆破中, 记录到尺度为10 m的岩块的往复运动及平均值为6.9 mm/s的慢速波^[13]. 2001–2010年, San Andreas断层的微震与远处地震关系的分析表明^[14], 地震波引发的微震以1–100 km/a的速度沿San Andreas断层迁移, 引起了San Andreas断层的慢速滑动.

地质构造岩体在长期的重力和地质构造应力的作用下, 聚集了很大的能量. 摆型波传播的另一个效应是, 由于临近块体间相互对应的摆动, 造成块系间的超低摩擦效应, 从而导致岩体平衡状态改变, 触发不同级别的能量释放, 在地球板块尺度上触发地震, 在工程尺度上诱发岩爆、冲击地压等. 此时释放的能量大大超过爆炸能量, 爆炸扰动仅起到了“扣扳机”的作用.

高能爆炸作用下岩体的变号反应的一个有趣特征是爆炸冲击的“长程作用”^[3,15,16], 即人工地震局部不可逆位移范围可达 $8-10R_{\text{crack}}$, R_{crack} 为爆炸破裂区半径. 同时, 大量的试验证实, 岩体的变形是一个显著的不均匀过程, 应变集中在薄弱区界面上, 在地下核爆炸诱发地震效应中, 沿着露出地表的断裂带的位移幅值达到米级或更大, 激发断裂带的长度可高达数百千米.

近十年来, 一些科学家越来越注意到岩石的块状层次结构在岩土材料和岩石动力学行为的非线性方面扮演的重要角色, 促使人们对这些方面展开了系列的试验和理论研究, 并已逐渐形成非线性岩石力学的重要研究方向——块系构造岩体力学. 本文的目的主要在于整理那些与岩体的构造层次相关的试验和理论成果, 这也是本研究团队致力多年的研究方向.

2 块系岩体变形的基本概念

岩体总是被大量不同等级的不连续间断面所间隔, 将岩体分割为一个个尺度大小不同的结构单元(岩块), 这些不连续间断面具有宽广的尺度范围^[17]. 其延度从 10^{-6} (组成岩石矿物的晶格缺陷)至 10^6 m (大的构造断层尺度), 其裂隙(裂缝)宽度从 10^{-8} 至 10^2 m. 为了量化这一模式, 俄罗斯施密特地球物理研究所的Sadovsky院士^[18]提出岩体的块系构造等级学说^[19]. 该学说将岩体看作由不同层次的构造单元所组成的集合体, 单元之间存在裂隙并由比岩石强度弱的材料所填充. 大到大陆板块或区域性岩体, 小到细砂的结构组成甚至晶体的结构单元, 岩体的结构具有嵌入特性或者层次

重复性, 在大的部分中嵌入小的部分, 而后者又有更小的部分嵌入(图1)^[20]. 这样, 每一等级水平上的岩体介质都可以表示成其下一层级不连续岩块的组合体.

Sadovsky等人^[21]通过对泥炭的破碎、石英的侵蚀、土壤颗粒的分析, 以及地下爆炸中岩石的破碎分析、露天采石场的岩石破碎分析、在建设水电站时利用地震地质方法对岩石非均匀性的分析、利用地质方法对地壳非均匀性的分析、地壳板块的分析、天体尺寸的分析等, 发现了块体数随块体尺寸的分布中存在着优势尺寸, 而且相邻的2个优势尺寸之比 $\lambda = L_i / L_{i+1}$ 相对稳定, 主要的变化范围为 $\lambda = 2.0-5.5$, λ 为岩石的嵌入系数.

同时试验还发现, 裂纹的张开尺寸 a_i 与被其所切割的相应等级的岩块尺度 L_i 之间存在着统计的岩石力学不变量^[19] $\mu_\Delta = a_i / L_i = (1/2 \sim 2) \times 10^{-2}$, 这一关系式对于估计岩石块体在受限环境下的可移动性至关重要.

目前还没有很好地描述复杂块体系统变形过程的数学手段. 在空间上取平均值的方法(均匀连续介质近似)不能描述块体介质在爆炸变形时的局部运动. 这就要求必须研究特殊的方法来描述在外部作用下真实岩体变形和破坏的过程.

块系岩体介质, 特别是任意的 n 级构造组成单元的基本变形特性由以下两个方面决定: 首先是其组成部分(块体及其间隙)的变形及强度特征参数, 其次是集合体的变形特征. 根据外部作用参数, 在某一时刻, 块系岩体介质的变形过程可分为三个阶段(图2):

(1) 可逆变形阶段. 在这一阶段, 介质的所有组成部分的变形均处于弹性限内, 并且介质的连续性无破坏. 在外部加载卸除后介质返回到初始状态.

(2) 不可逆协调变形阶段. 在该阶段, 塑性非协调

图1 (网络版彩图) 岩体的构造等级示意图^[20]

Figure 1 (Color online) Sketch of block hierarchical structures of rock mass^[20].

图 2 (网络版彩图)非均匀介质的变形阶段

Figure 2 (Color online) The deformation stages of inhomogeneous material.

变形区域形成,但是没有破坏介质的连续性,在较低强度构造单元上形成的塑性非协调性可由其他区段的弹性变形来补偿.这时产生的内部应力在外部荷载卸除后仍然存在.因此,在非均匀介质中可能出现作用在组合体或单独的构造单元上的力矩.

(3) 非协调变形阶段.在该阶段,构造单元的变形伴随着介质连续性的破坏,形成独立运动的构造单元.

3 块系岩体在地下大规模爆炸条件下的变形的现象学基础

3.1 地下核爆炸诱发人工地震效应

全球1945–1998年共进行了2052次核试验^[22],大部分是在地下进行,如苏联共进行了715次核试验,地下496次;美国共进行1032次核试验,地下815次.试验确定,地下核爆炸时,环绕在爆炸空腔周边的爆炸波阵面上应力超过40 GPa,岩石发生熔化.随着爆心距离的增加,应力波幅值减小,顺次出现破碎区及径向裂纹区.径向裂纹区比例半径可以达到 $R_{\text{crack}}/Q^{1/3} \sim (70\text{--}100) \text{ m/kt}^{1/3}$.按照连续介质力学,径向裂纹区之外是弹性区,不可能出现不可逆变形,但实际结果是,在超出爆炸的强作用

区很大的范围内,出现介质的强非平衡状态,表现为残余地震场,发生工程性地震导致的大断层面的不可逆位移,例如1968年4月26日美国内华达地下1160 m处,当量为1200 kt的Boxcar地下核爆炸^[23],引起最远距震中水平距离6100 m处地表已有断层的破裂,断层错动的最大垂直相对位移为1 m,其不可逆位移比例半径达 $584 \text{ m/kt}^{1/3}$,远远超过按连续介质力学模型计算的结果.

表1中统计了从历次核试验公开资料中获得的地下核爆炸诱发人工性地震统计资料^[24].

3.2 地下核爆炸中激活岩块现象

这一科学领域的理论和试验研究于1970–1980年首先开始于哈萨克斯坦施密特地球物理研究所.地下大规模爆炸后(爆炸当量0.5–100 kt)的岩体块系结构变形监测在具有大型裂缝和断层的岩体中展开^[15].

地下大规模爆炸中,某岩块被“激活”意味着该岩块相对于周围岩块发生了转动或移动.俄罗斯学者根据不同规模的地下爆炸中,地下坑道围岩侧墙的倾斜测量和水准测量结果以及岩体断层、裂隙、节理的地质数据联合研究分析得到了“激活”岩块的边界,这个边界基本上就是观测所得到的岩体角位移和线位移的最大梯度发生处.图3为“激活”岩块尺寸在历次爆炸中的测量结果^[15],基于上述实际测量数据,俄罗斯学者指出,大多数情况下,激活块体的尺寸可归纳为简单公式:

$$L = 10\sim 30Q^{1/3} (\text{m/kt}^{1/3}). \quad (1)$$

俄罗斯学者根据地下大爆炸试验表明,岩体“块体性”的激活程度由爆炸当量决定.爆炸当量越大,则“激活”岩块的尺度越大.

表 1 地下核爆炸不可逆位移实测结果^[24]

Table 1 The experimental results of irreversible deformation of underground explosion [24]

核爆炸 试验	时间	岩性	当量 (kt)	埋深 (m)	地表不可逆 范围 (m)	不可逆位移比例 半径 ($\text{m/kt}^{1/3}$)	地震边界 速度 v_0 (m/s)	k_d	最大断层 错动 (m)
Greeley	1966.12	Zeolitized tuff	825	1215	5200	570	0.16	4.9×10^{-10}	1.20
Duryea	1966.04	Rhyolite	65	547	790	239	0.63	8.0×10^{-9}	0.12
Boxcar	1968.04	Zeolitized tuff	1200	1160	6100	584	0.15	4.6×10^{-10}	1.00
Benham	1968.12	Tuff	1100	1400	13000	1260	0.04	1.6×10^{-10}	0.46
Milrow	1969.10	Pillow lava	1000	1219	8000	809	0.09	1.6×10^{-10}	<1.0
NKNT 6	2017.09	—	212	450	1692	284	0.28	4.0×10^{-9}	4

图 3 (网络版彩图)“激活”块体尺寸与比例距离之间关系^[15]
Figure 3 (Color online) The relationship between size of activated blocks and scaled distance^[15].

4 块系岩体变形破坏的计算理论模型

4.1 基于岩块旋转和平移过程力学分析的计算模型

为描述大规模爆炸时介质的变形过程, 文献^[16,20]假定岩体是由图1所示的嵌套结构所组成的集合体, 在介质变形的过程中, 不同尺度的结构单元具有相同的表现, 在每一个变形阶段, 某一特定尺度的结构单元对宏观运动有主要贡献。

构造介质的变形过程根据下列假设进行描述. 当量为 Q 的集中装药在介质中爆炸. 当作用的幅值不超过块间材料的强度参数时, 岩体表示成均匀连续介质, 其行为可由经典弹性理论描述. 在力学作用的强度增加时, 微观层面上出现了较高的不均匀应力, 在微观水平上应力场的不均匀性也增加. 当一个或多个弱面上地质块体之间的填充物达到临界应力状态时, 之前的连续介质开始解体成结构单元, 意味着岩块被激活, 激活构造的具体尺度 L_* 对应于岩体中天然的岩块尺寸 L_i , 并由施加于介质上的爆炸作用的强度和规模所决定. 所形成的构造单元的运动可以是相互独立的, 可能出现力和力矩, 并进而产生构造单元的平动和转动(图4).

在分析过程中假设岩块的刚度远远大于软弱夹层的刚度, 因此岩块可看作是刚性的, 变形主要集中于岩块间的接触面. 由于岩块的运动, 使岩块与岩块间的软弱夹层产生剪切应变:

图 4 (网络版彩图)具有层次构造块体激活以后的宏观位移组成^[20]. (a) 受限平动; (b) 受限转动

Figure 4 (Color online) Composition of the macro-displacement of hierarchical blocks after been activated^[20]. (a) Limited translation; (b) limited rotation.

$$\varepsilon = \frac{U_i}{a_i}. \quad (2)$$

由于假设岩块是刚性的, 即岩块不可压缩, 因此第 i 级岩块的转动(或者平动)极限 U_{i*} 取决于刚性岩块接触面之间的间隙宽度 a_i 及其充填层的极限应变 $\varepsilon_{\max}$, 即

$$U_{i*} = \varsigma a_i, \quad (3)$$

其中 ς 为充填层物质的极限压缩比, $\varsigma < 1$.

宏观位移由尺度为 L_* 的耗散结构的受限旋转决定, 考虑到 $L_* = L_i$ 层次以上的岩块(L_{i+1} , L_{i+2} , ...)均对宏观位移的产生做出贡献, 则得出宏观位移表达式:

$$\begin{aligned} U_* &= U_{i*} + U_{i+1*} + U_{i+2*} + \dots = \varsigma(a_i + a_{i+1} + a_{i+2} + \dots) \\ &\approx \varsigma \left(\mu_\Delta L_* + \mu_\Delta \frac{L_*}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

对上式进行计算可得到激活块体的尺度计算式为

$$L_* \approx \frac{\lambda U_*}{\zeta \mu_\Delta (1 + \lambda)}. \quad (5)$$

对于给定爆炸当量的地下大规模爆炸, 可通过式(5)估算激活块体的尺度和构造介质的变形, 试验测得的爆炸扰动波的形式为

$$v(r, t) = v_0(r) \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (6)$$

其中, $v_0(r) = A(r/Q^{1/3})^{-n}$ 为距离爆心为 r 处的粒子最大运动速度, $\tau = \frac{B}{C_p} Q^{1/3} (r/Q^{1/3})^m$ 为爆炸扰动波的持续时间, A, B, m, n 为通过试验确定的参数, C_p 为纵波速度.

通过速度对时间积分得到爆炸扰动条件下岩体运动的位移表达式:

$$U = \int_0^\tau v(r, t) dt = \int_0^\tau v_0 \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) dt = \frac{v_0 \tau}{\pi} \left(1 - \cos\frac{\pi t}{\tau}\right). \quad (7)$$

当 $t = \tau$ 时上述位移达到最大值:

$$U_{\max} = \frac{2v_0 \tau}{\pi}, \quad (8)$$

其中, $U_{\max}$ 为通过试验测得的距离爆心距离为 r 处的岩体最大位移, 而 U_* 为尺度为 L_* 的最大激活岩块发生受限运动所能够获得的最大位移, 如果令 $U_* = U_{\max}$, 并将式(8)代入上述公式可得到激活块体的尺度与爆炸当量及爆心距之间的关系为

$$\frac{L_*}{\sqrt[3]{Q}} = A' \left(\frac{r}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{m-n}, \quad (9)$$

其中, $A' = \frac{2AB\lambda}{\pi C_p \zeta \mu_\Delta (1 + \lambda)}$ 为常数.

利用俄罗斯地下大当量爆炸激活岩块的场地试验数据(图5)进行拟合得到 $A' \approx 0.105$, $m - n \approx 1.04$.

文献[16, 20]利用岩体的等效平均极限应变 $\varepsilon_* = \frac{U_{\max}}{L_* + a} \approx \frac{U_*}{L_*}$ 作为岩体不可逆运动的评价, 根据式(4), ε_* 与 ζ 存在下列关系:

$$\varepsilon_* = \frac{U_*}{L_*} \approx \mu_\Delta \zeta \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right). \quad (10)$$

从上式可以看出, ε_* 的取值主要取决于 $\mu_\Delta \zeta$, 岩石力学不变量 μ_Δ 对岩体的局部不可逆变形做出了积极贡献. 对于具体的软弱充填物质, $\zeta \approx 10^{-3} - 10^{-2}$, 同时考虑

图5 (网络版彩图) 地下大当量爆炸激活岩块的场地试验数据[25]

Figure 5 (Color online) The field testing results of rock size activated by large equivalent underground explosion [25].

到 $\lambda = 2.0 - 5.5$, $\mu_\Delta \approx (1/2 - 2) \times 10^{-2}$, 则 $\varepsilon_* \sim 10^{-5}$. Adushkin 等人[5]曾根据潮汐运动及其他构造运动中累积的众多资料指出 ε_* 的最小值可取为 $(1 - 2) \times 10^{-5}$, 二者基本一致.

对式(9)进行变换得到以 ε_* 评价的不可逆位移范围计算公式:

$$\frac{r}{Q^{1/3}} = \left(\frac{2AB}{\pi \varepsilon_* C_p L_*} \right)^{\frac{1}{n-m}} Q^{\frac{1}{3(n-m)}}. \quad (11)$$

4.2 基于能量分析原理的计算模型

文献[26-28]深入研究了地冲击作用下深部围岩的能量转化、释放过程, 从能量分析角度建立了强压缩岩体有势场与扰动场相互作用的非线性岩石力学理论模型, 根据统计物理方法, 得到了扰动作用下岩体的等效势能:

$$U_{\text{eff}} = U + W = U + \frac{1}{2M\omega^2} f^2 = U + \frac{1}{2} M_d \bar{v}^2, \quad (12)$$

其中, U_{eff} 为等效势能, U 为围岩有势场, W 为地冲击扰动场. $M \sim \rho L_*^3$ 为激活岩块质量, ω 为扰动频率, f 为扰动力, 对于式(6)所示的爆炸地冲击扰动, 作用在岩块上的地冲击荷载为

$$f = \sigma_f \chi L_*^2, \quad \sigma_f = \rho C_p v, \quad (13)$$

其中, χ 为形状系数, 反映了动应力作用面积大小, 对于

立方体 $\chi \approx 4$.

扰动的作用仅是增加了输运能量的梯度, 触发并加快了能量释放与转化为动能的速率.

文献[25]提出了定量表征爆炸各分区变形特征的能量因子, 对于式(13)所示扰动形式, 在诱发人工地震效应边界, 能量因子特征阈值为

$$k = \frac{W}{MC_p^2} = \left(\frac{2v_0 t_c}{L^* \pi} \right)^2 = \left(\frac{u}{L^*} \right)^2. \quad (14)$$

在爆炸地冲击作用下激活尺度为 L^* 的岩块变形主要发生在块系间软弱结构面, 如果变形 $\varepsilon = u/L^*$ 不超过临界值 ε_* , 那么不可逆变形就不会出现, 由此得到爆炸诱发工程地震效应边界的特征能量因子阈值:

$$k_d = \varepsilon_*^2 \approx (1-4) \times 10^{-10}. \quad (15)$$

不可逆位移区域边界对应的典型粒子速度计算式为

$$v_d = \varepsilon_* C_p = \sqrt{k_d} C_p = (0.05-0.15) \text{ m/s}. \quad (16)$$

这一速度为可以看到的地震爆炸效应的边界. 表1中通过地下核爆炸效应统计试验数据获得的能量因子阈值与不可逆位移区域边界粒子速度与通过构造运动中累积的资料基本一致. 这可以作为人工地震与天然地震相比拟的一个例证.

考虑到 $v_0 t_c = \frac{AB}{C_p} \left(\frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{m-n} Q^{1/3}$ 以及岩块不可逆位

移的临界能量条件(特征能量因子 k 超过 k_d 时相邻岩块间发生不可逆运动), 则根据式(14)得到地下核爆炸诱发不可逆位移范围 r_d 的计算公式:

$$\frac{r_d}{Q^{1/3}} = \left(\frac{2AB}{\pi L^* C_p \sqrt{k_d}} \right)^{\frac{1}{n-m}} Q^{\frac{1}{3(n-m)}}, \quad (17)$$

或

$$\frac{r_d}{Q^{1/3}} = \left(\frac{2AB}{\pi C_p L^* \varepsilon_*} \right)^{\frac{1}{n-m}} Q^{\frac{1}{3(n-m)}}. \quad (18)$$

式(17)和(18)与基于等级构造岩块在爆炸冲击作用下的运动分析所获得的计算公式相一致.

也可以借助于介质中不可逆变形出现时的粒子速度幅值来确定爆炸作用的给定区域. 令式(6)中 $v_0(r) = v_d = \sqrt{k_d} C_p$, 可以得到用 k_d 表示的局部不可逆位

移范围计算公式:

$$\frac{r_d}{Q^{1/3}} = \varphi k_d^{\frac{1}{2n}}, \varphi = \left(\frac{A}{C_p} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (19)$$

Adushkin和Spivak^[5]曾统计了涵盖采矿爆破和地下核爆炸的大量地下爆炸试验数据, 给出了不同岩体中爆炸 A 和 n 的统计值, 如表2所示.

根据表2中不同岩石 A 和 n 的场地效应实测数据, 结合地下大规模爆炸诱发岩块局部不可逆位移的特征能量因子 k 阈值, 可以评估地下核爆炸不可逆位移范围, 计算结果如图6所示.

计算结果与现场实测数据基本吻合.

5 结论

(1) 地质岩体是典型的非均匀、非连续含能地质体, 爆炸冲击等动力扰动源在非均匀、非连续构造岩体中的聚能效应, 引发深地岩体中不同于浅部地运动

表2 参数 A 和 n 的统计值^[5]

Table 2 The statistical values of A and n [5]

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

图6 (网络版彩图)地下核爆炸诱发不可逆位移范围与试验结果对比

Figure 6 (Color online) Comparison of the calculation results with experimental data of the nuclear explosion induced irreversible motion.

的摆型波(慢波)、岩块间超低摩擦、大能量释放(显著的变形局部化、岩爆、工程性地震)等非线性力学响应.

(2) 对动力冲击作用下岩块运动的分析表明, 在距离爆炸较远处可能发生了由于岩体的块体结构和力矩导致的不同尺寸块体的旋转和平动所导致的断层错动人工地震效应.

(3) 通过块系岩体变形破坏的计算理论模型的计算模型和大量的试验数据确定了地下核爆炸激活块体的尺度及确定了爆炸引起的块系岩体中不可逆变形区的范围.

(4) 岩体和地下结构中变形局部化的存在及相关的稳定性问题, 需要对大规模爆炸条件下地质断层对岩体力学行为的影响特征进行持续深入的研究.

参考文献

- 1 Qian Q H. Threat of nuclear missile faced in strategic protection works and inapplicability of continuum mechanical model (in Chinese). *Protect Eng*, 2005, 26: 1–10 [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. *防护工程*, 2005, 26: 1–10]
- 2 Kurlenya M V, Oparin V N. Problems of nonlinear geomechanics. Part II. *J Min Sci*, 2000, 36: 305–326
- 3 Adushkin V V, Oparin V N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeidia. Part I. *J Min Sci*, 2012, 48: 203–222
- 4 Adushkin V V, Oparin V N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeidia. Part III. *J Min Sci*, 2014, 50: 623–645
- 5 Adushkin V V, Spivak A A. Underground Explosions, Chapter 8: The Influence of Faults, Joints, and Fractures, on Mechanical Effects of Underground Nuclear Explosions. Translated by Anastasia S and Paul R. Washington: Weston Geophysical Corp, 2015. 431–479
- 6 Adushkin V V, Spivak A A. Characteristic features of the deformation of a block medium during blasting. *Soviet Min Sci*, 1990, 26: 142–147
- 7 Kurlenya M V, Oparin V N. Sign-variable reaction of rocks to dynamic impacts. *Soviet Min Sci*, 1990, 26: 291–300
- 8 Kurlenya M V, Oparin V N, Vostrikov V I. Pendulum-type waves. Part II: Experimental methods and main results of physical modeling. *J Min Sci*, 1996, 32: 245–273
- 9 Kurlenya M V, Oparin V N, Vostrikov V I, et al. Pendulum waves. Part III: Data of on-site observations. *J Min Sci*, 1996, 32: 341–361
- 10 Li J, Wang M Y, Jiang H M, et al. Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock. Part I: Experimental research on properties of one-dimensional wave propagation in block rock masses (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 38–52 [李杰, 王明洋, 蒋海明, 等. 爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题(I): 一维块系岩体波动特性的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37: 38–52]
- 11 Li J, Jiang H M, Wang M Y, et al. Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock. Part II: Physical model test on sliding of rock blocks triggered by external disturbance (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 291–301 [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拟试验. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37: 291–301]
- 12 Pan Y S, Wang K X. Study effect of block-rock scale on pendulum-typewave propagation (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31: 3459–3465 [潘一山, 王凯兴. 岩块尺度对摆型波传播影响研究. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31: 3459–3465]
- 13 Bagaev S N, Oparin V N, Orlov V A, et al. Pendulum waves and their singling out in the laser deformograph records of the large earthquakes. *J Min Sci*, 2010, 46: 217–224
- 14 Shelly D R, Peng Z, Hill D P, et al. Triggered creep as a possible mechanism for delayed dynamic triggering of tremor and earthquakes. *Nat Geosci*, 2011, 4: 384–388
- 15 Kocharyan G G, Spivak A A. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions. Part I: experimental data. *J Min Sci*, 2001, 37: 64–76
- 16 Kocharyan G G, Spivak A A, Budkov A M. Budkov movement of rock blocks during large-scale underground explosion. Part II: Estimates by analytical models, numerical calculations, and comparative analysis of theoretical and experimental data. *J Min Sci*, 2001, 37: 149–168
- 17 Qi C Z, Qian Q H, Wang M Y, et al. Structural hierarchy of rock massif and mechanism of its formation (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24: 2838–2846 [戚承志, 钱七虎, 王明洋, 等. 岩体的构造层次及其成因. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24: 2838–2846]
- 18 Sadovsky M A. Natural lumpiness of rocks. *Doklady AN SSSR*, 1979, 247: 829–832
- 19 Kurlenya M V, Oparin V N. Problems of nonlinear geomechanics. Part I. *J Min Sci*, 1999, 35: 216–230
- 20 Li J, Chen W, Shi C C, et al. Calculation method of irreversible deformation region radius under large-scale underground explosion based on

- block hierarchical structure (in Chinese). *Exp Shock Waves*, 2018, 38: 1271–1277 [李杰, 陈伟, 施存程, 等. 基于块系构造的大规模地下爆炸不可逆位移计算方法. *爆炸与冲击*, 2018, 38: 1271–1277]
- 21 Sadovsky M A, Volkhovitinov L G, Pisapenko V F. *Deformation of Geophysical Medium and Seismic Process*. Moscow: Science Press, 1987
 - 22 Bergkvist N O, Ferm R. *Nuclear Explosions 1945-1998. Technical Report*. Stockholm: Division of Systems and Underwater Technology, Defence Research Establishment, 2000: 14–15
 - 23 Cloud W K, Carder D S. Ground effects from the boxcar and Benham nuclear explosions. *Bull Seismol Soc Am*, 1969, 59: 2371–2381
 - 24 Xu T H, Li J, Wang M Y, et al. Analysis of test data of underground nuclear explosions and the calculation of the range of irreversible deformation (in Chinese). *Explosion Shock Waves*, 2019, 1: 1–17 [徐天涵, 李杰, 王明洋, 等. 地下核爆炸诱发工程性地震实测数据分析与不可逆变形范围计算. *爆炸与冲击*, 2019, 1: 1–17]
 - 25 Wang M Y, Li J. Nonlinear mechanics problems in rock explosion and shock. Part III: The calculation principle of engineering seismic effects induced by underground nuclear explosion and its application (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2019, 38: 695–707 [王明洋, 李杰. 爆炸与冲击中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. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38: 695–707]
 - 26 Wang M Y, Li J, Li K R. A nonlinear mechanical energy theory in deep rock mass engineering and its application (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2015, 34: 659–667 [王明洋, 李杰, 李凯锐. 深部岩体非线性力学能量作用原理与应用. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34: 659–667]
 - 27 Wang M, Li J, Ma L, et al. Study on the characteristic energy factor of the deep rock mass under weak disturbance. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49: 3165–3173
 - 28 Wang M Y, Li J, Qiu Y Y, et al. Calculation method for irreversible deformation region radius under large-scale underground explosion based on law of energy (in Chinese). *Exp Shock Waves*, 2017, 37: 685–691 [王明洋, 李杰, 邱艳宇, 等. 基于能量原理的大规模地下爆炸不可逆位移计算方法. *爆炸与冲击*, 2017, 37: 685–691]

The theory development and application of deep nonlinear dynamic rock mechanics

LI Jie^{1,2*}, WANG MingYang^{1,2}, CHEN HaoXiang¹ & XU TianHan¹

¹ State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, the Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

² School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

This paper systematically summarized the development of deep nonlinear rock dynamics under the action of strong dynamic loading like explosions. It also pointed out that the structural characteristics of rock mass should be considered when studying the dynamic events such as artificial earthquakes and rockburst. By analyzing the basic deformation characteristics of rock blocks under large-scale explosions, a progressive evolution model to analyze irreversible displacements of rock mass was constructed. The relationship between the sizes of activated rock blocks under explosions with different equivalent and their distance from the explosion centers was established. A calculation method to determine the safe distance of earthquakes induced by underground nuclear explosions was proposed according to the range of irreversible displacement. The validity of the theoretical methods was comprehensively verified by comparing with underground nuclear test data of the United States, Russia and France.

rock block, post-explosion effect, artificial earthquake

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0190](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0190)