

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0505

地下核爆诱发工程性地震实测数据分析与不可逆变形范围计算*

徐天涵¹, 李杰^{1,2}, 王明洋^{1,2}, 徐小辉^{1,2}, 何雯静³

(1. 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;

2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

3. 火箭军研究院, 北京 100094)

摘要: 地下核试验瞬间释放的巨大能量引起地壳能量的连锁反应, 产生诱发地震等地球物理现象。本文对 20 世纪前苏联与美国进行的地下核试验数据进行整理与归纳, 给出地下核爆炸试验诱发工程地震的范围以及激活岩块大小等。根据实测数据, 指出地下核爆炸诱发工程性地震的力学本质, 利用理论公式计算了地下核爆炸产生不可逆位移的临界能量因子范围, 为相关研究提供理论基础和场地效应试验数据。

关键词: 地下核爆; 工程性地震; 不可逆位移范围; 特征能量因子; 激活岩块

中图分类号: O383.1 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

地壳岩体是具有复杂内部构造层次的介质, 在长期的重力和地质构造应力的作用下, 不断聚集能量, 当积聚的变形超出了岩体的承受能力, 就会产生突然的断裂或沿已有断裂面的错动, 在构造运动中长期积累的能量得到迅速释放, 从而形成地震(构造地震)^[1]。研究表明, 在地壳中的弹性应变能被释放掉之前, 地壳中的原有断层都具有潜在活化的可能, 任何影响断层稳定性的微小扰动, 例如水库蓄水、采矿和地下核爆炸等, 都存在诱发地震的可能性^[2]。理解地震诱发的原因及其破坏性影响, 是地震学和防护学研究的重点。

早在 20 世纪 50~60 年代, 美国、苏联的科学家就注意到, 在地下核爆炸几天之后, 有时会在几百甚至几千米外发生地震, 释放的总能量超出爆炸本身千倍量级^[3]。这一巨大的摧毁能力, 在冷战的格局下, 甚至被作为地震武器的设想加以关注。美国、俄罗斯等国家高度重视地震触发机制的研究, 例如 Adushkin 等^[4-6]、Rodinov 等^[7]、Kocharyan^[8-11]、Nikolaev 等^[12] 都对于地震的触发机制进行了广泛的实验与理论研究, 并每年召开地球系统的地震触发机制学术会议。

目前关于核爆炸触发地震的可能性已基本取得学界共识, 但相关研究仍处于定性解释的阶段, 远未达到机理清晰、模型准确的程度。例如: 目前已知, 核爆炸是否会诱发地震, 以及诱发地震的大小取决于场地的地质背景。特殊的岩性组合、有利于地震发生的断层与不连续结构面的存在以及岩体应力状态等, 都是诱发地震的必要条件。然而其充分条件是什么? 在一定的地质条件和爆炸当量条件下, 会否诱发地震? 诱发地震的量级是多少? 能否对修建于岩层中的地下工程产生影响? 可否采取相应的工程措施以减少即将到来的工程灾害? ……这些问题目前尚未有一致性的相关研究成果。研究的困难主要在于工程地质条件的复杂不可探测性以及试验样本数量的稀少。

目前国际社会已全面禁止核试验, 对核爆炸诱发地震的研究只能立足已有的核试验数据。据不完全统计, 自 1945 年首次核试验至今, 全球共进行 2 000 余次核试验, 其中地下核试验 1 500 余次。但由于试验国家对数据的保密以及受当时落后测量条件的制约, 公开的试验数据及其完整性十分有限, 且这些数据分散于各种文献, 十分不利于研究。

* 收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2019-01-19

第一作者: 徐天涵(1995—), 男, 博士研究生, martinxu41@126.com;

通信作者: 李杰(1981—), 男, 博士, 副教授, lijierf@163.com。

基于上述理由,本文对各文献记录的地下核爆炸试验场地数据进行整理汇总,并归纳总结地下核爆炸试验诱发工程地震的范围、临界能量阈值、激活岩块大小等,为相关研究提供场地效应试验数据。

1 地下核爆诱发工程地震效应的现场数据

1.1 GREELY 核爆炸

1966 年 12 月 20 日,美国在内华达试验场 Pahute Mesa 试验区深 1 215 m 处进行了 GREELY 核爆炸^[13]。爆炸当量为 825 kt,周边岩体介质为沸石凝灰岩。爆炸震级为 6.1 级,其最远地表错动距爆心投影点(爆心在地表的垂直投影)约 5 200 m,超出爆心投影点约 760 m 的错动基本发生在先前存在的自然断层附近。距爆心投影点若干千米外的地表最大相对垂直位移为 120 cm。爆炸产生最大裂缝长度为 6.9 km,地表断层及位移分布见图 1(图中数字单位为 cm,下同)。

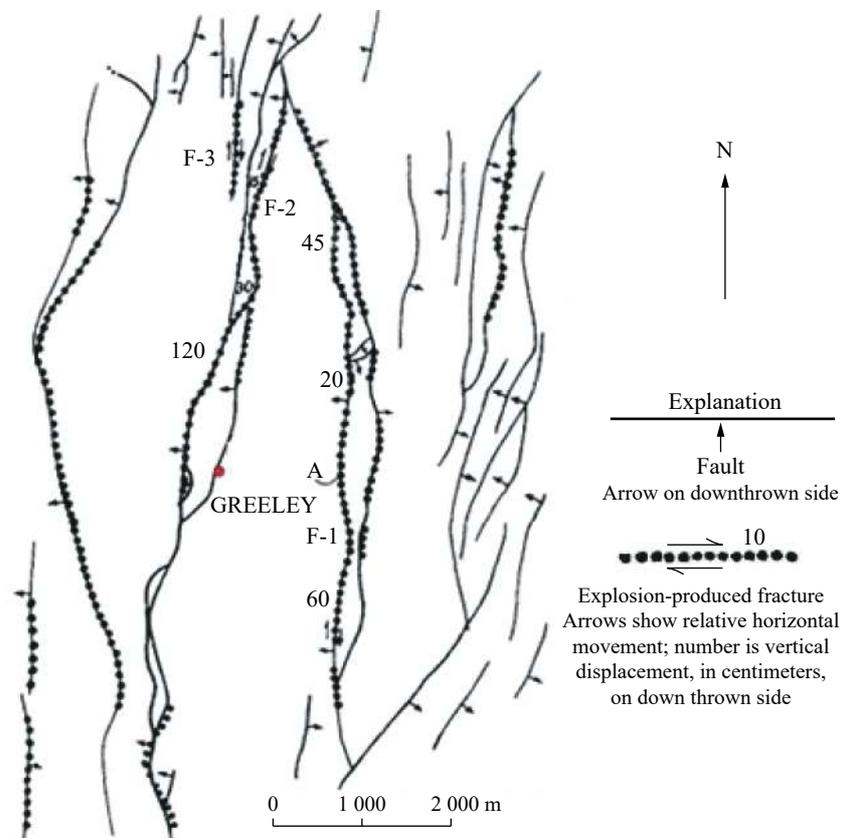


图 1 GREELY 引起的主要地表错动

Fig. 1 Ground motion induced by GREELY

GREELY 核爆炸主要引起 3 条断层的水平相对位移。第 1 条断层 F-1 在距爆心投影点东侧 1 200 m 之外,在点 A 南部出现长约 1 800 m 的连续右旋水平相对位移,最大为 15 cm,而点 A 北部 3 500 m 范围内只有垂直相对位移出现。其余两处为断层 F-2 与 F-3,分别在爆心投影点北部 1 700 m 和 3 000 m 处。在断层 F-2 上,若干厘米的右旋水平相对位移以及垂直位移从爆心投影点北部 3 700 m 处一直向南延伸直至 F-2 在距爆心投影点北部约 1 700 m 处分叉成两条断层。分叉点南部的两条断层都出现了从几厘米至最大 120 cm 的垂直相对位移。断层 F-3 处仅出现若干厘米的右旋水平位移。

1.2 DURYEА 核爆炸

1966 年 4 月 14 日,美国在内华达试验场 Pahute Mesa 区深 547 m 处进行了 DURYEА 核爆炸^[13]。爆

炸当量为 65 kt, 介质为流纹岩。爆炸震级为 5.1 级, 产生的地表错动最远距爆心投影点 790 m, 爆炸产生最大裂缝长度为 1.1 km, 地表断层及位移分布见图 2。

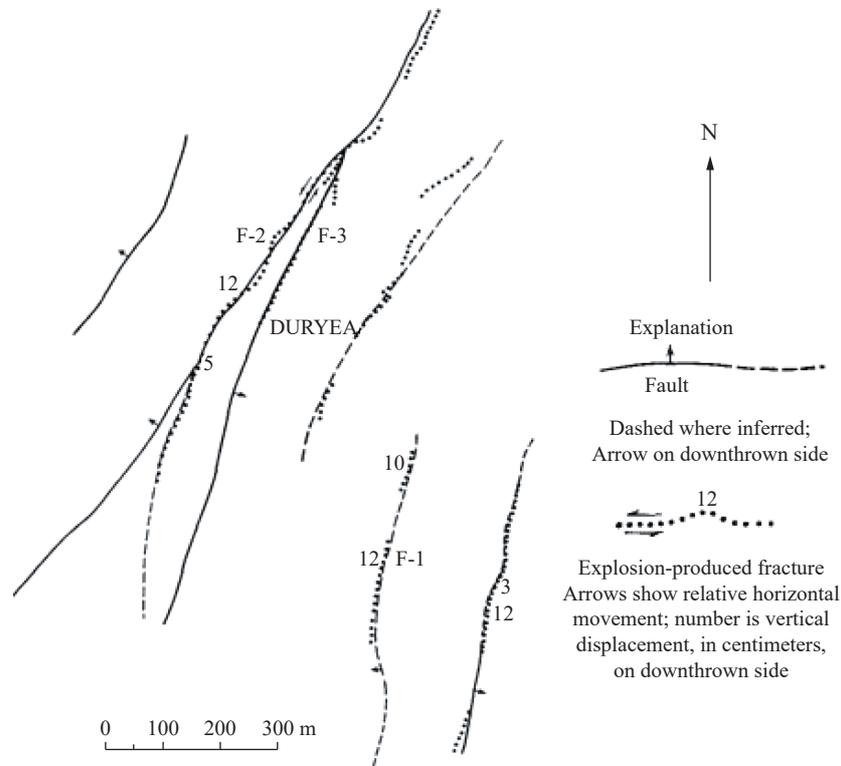


图 2 DURYEA 引起主要地表错动

Fig. 2 Ground motion induced by DURYEA

几乎所有距爆心投影点 600 m 以内的自然断层都发生错动。断层 F-2 与 F-3 上最大垂直相对位移为 12 cm, F-2 北部端点附近出现大约 5 cm 的左旋水平相对位移。最显著的运动发生在断层 F-1 上, 虽然在断层上可见的垂直相对位移为 10~12 cm, 但在一条东西走向穿过断层的等高线表现出的位移为 18 cm。更重要的是, 沿该等高线的位移随距断层距离而衰减的梯度比穿过的其他断层要小。位移平缓的变化意味着断层 F-1 的错动延伸至一定深度。

1.3 BOXCAR 核爆炸

1968 年 4 月 26 日, 美国于内华达试验场 Pahute Mesa 区深 1 158 m 处进行了 BOXCAR 核爆炸^[13]。爆炸当量为 1 200 kt, 介质为沸石凝灰岩。爆炸产生的沿已有断层的破裂最远距爆心投影点 6 100 m, 激活最大裂缝长度约为 8.0 km, 爆炸震级为 6.2 级。

爆炸引起最明显的错动在距爆心投影点东部 915 m 处的南北走向断层上(图 3)。错动并不与断层位置完全一致, 但其关系是明显的。沿该断层的错动长达 7 930 m, 最大垂直相对位移为 1 m, 位移距爆心投影点东南方 1 070 m 处。一般来说地表位移随距爆心投影点距离增加而减小, 但在该爆心投影点南部 2 590 m 处出现 30 cm 垂直相对位移, 而在北部 2 750 m 处出现 45 cm 垂直相对位移。在爆心投影点东部观察到大于 10 cm 的左旋水平相对位移, 爆心投影点东北方 2 290 m 处观察到约 6 cm 的左旋水平相对位移。

Cloud 等^[14]还对地下爆炸引起的地表运动进行了测量。加速度测量结果见图 4, 横坐标为测点距爆心投影点距离 D , 纵坐标为加速度 a 与重力加速度 g 的比值。图 5 所示为爆炸引起地表振动的幅值, 横坐标为测点距爆心投影点距离 D , 纵坐标为地表振动最大振幅 A , 测点分别位于岩石与冲积层之上。图 6 所示为地表振动振幅 A 与振动周期 T 的比值, 该比值可以表征速度的大小。

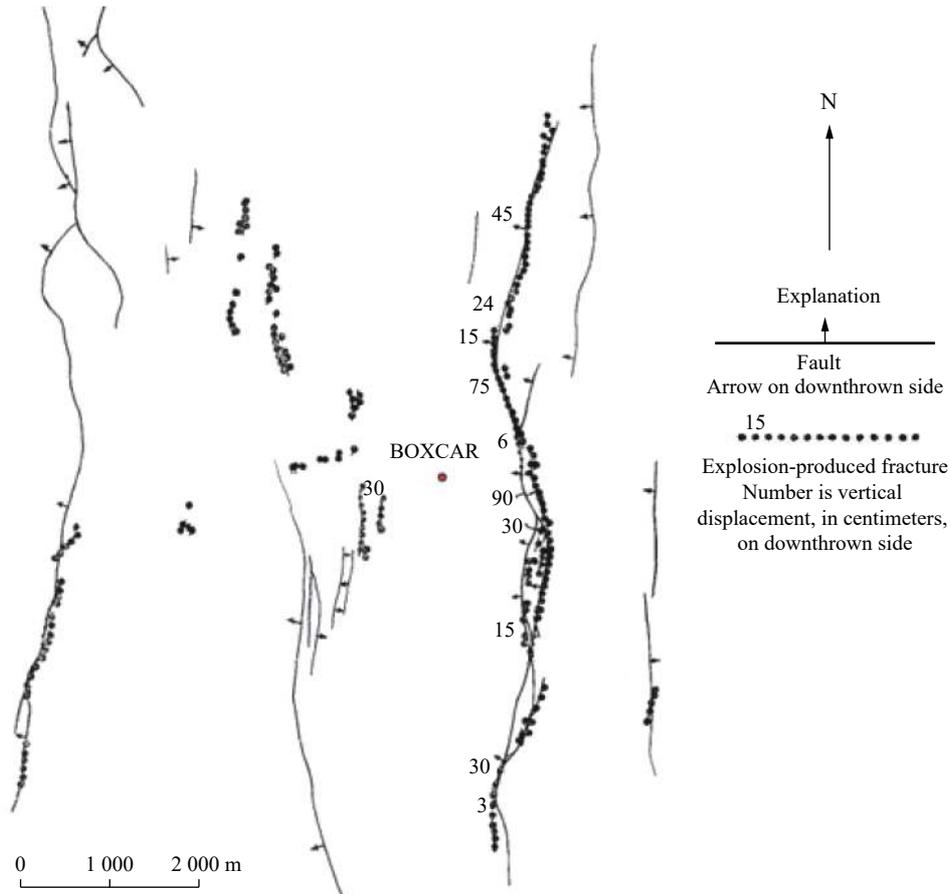


图 3 BOXCAR 引起主要地表错动

Fig. 3 Ground motion induced by BOXCAR

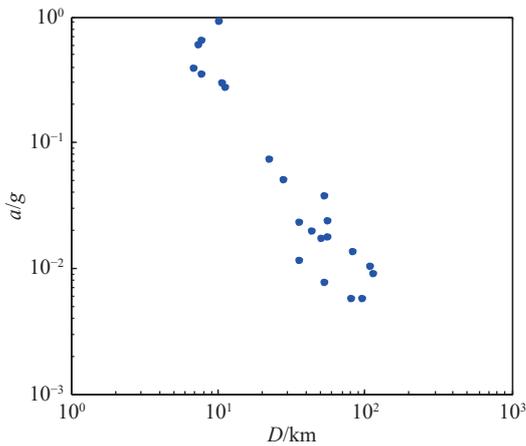


图 4 BOXCAR 引起地表最大加速度

Fig. 4 Maximum ground acceleration induced by BOXCAR

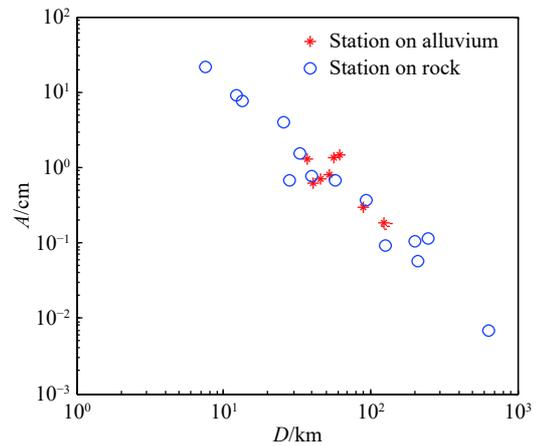


图 5 BOXCAR 引起地表运动幅值

Fig. 5 Amplitude of ground motion induced by BOXCAR

1.4 FAULTLESS 核爆炸

1968 年 1 月 19 日, 美国在内华达 Hot Creek 山谷深 975 m 处进行 FAULTLESS 核爆炸^[13]。观测到的爆炸产生最远的断裂带位于爆心投影点西侧 2 750 m 处, 观测到最大垂直位移为 3 cm。爆炸产生最大裂缝长度为 4.1 km, 爆炸震级为 6.1 级。

爆炸产生的最显著的效应是在距爆心投影点 3 200 m 范围内的沿线性构造的错动。3 处主要的地

表错动分别沿线性构造 A、B 和 C(图 7)。其他错动几乎都不同程度地与剩下的线性构造相一致。

为方便描述, 将地表错动以距爆心投影点 600 m 为界分为两组。

1.4.1 600 m 以内的地表错动

在距爆心投影点 600 m 内的两条向东北延伸的主要断裂带形成了地堑的边界。在地堑内有另一条断裂带与其余两条平行, 且爆心投影点位于其西北方约 60 m 处。地堑西北方的边界上最大垂直相对位移为 2 m, 到端点处降为 0。该边界上也出现了 30 cm 的右旋水平相对位移。地堑东南边界的断裂带最大垂直位移为 4.5 m, 位于爆心投影点南部。从最大位移处向东北方向

垂直位移逐渐且无规律地衰减, 向西方向衰减较快。在该断裂带上, 位于爆心投影点南部处存在 1 m 的右旋水平相对位移, 该处东北方约 760 m 位置出现约 60 cm 的左旋水平相对位移。断裂带端点附近位移降至 3 cm 以内。在爆心投影点南部约 60 m 处的断裂带上有最大 3 m 的垂直相对位移, 沿该断裂带到处存在左旋水平相对位移。

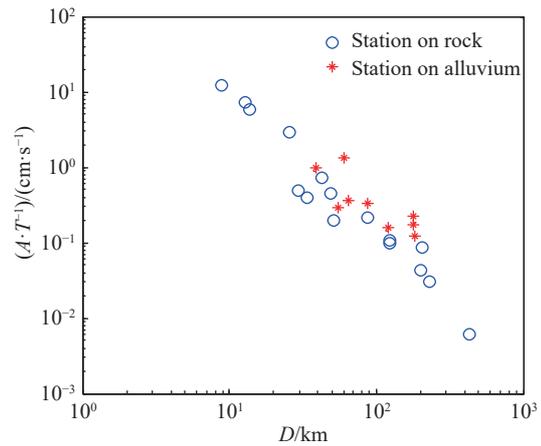


图 6 BOXCAR 引起地表振动最大速度

Fig. 6 Maximum ground velocity induced by BOXCAR

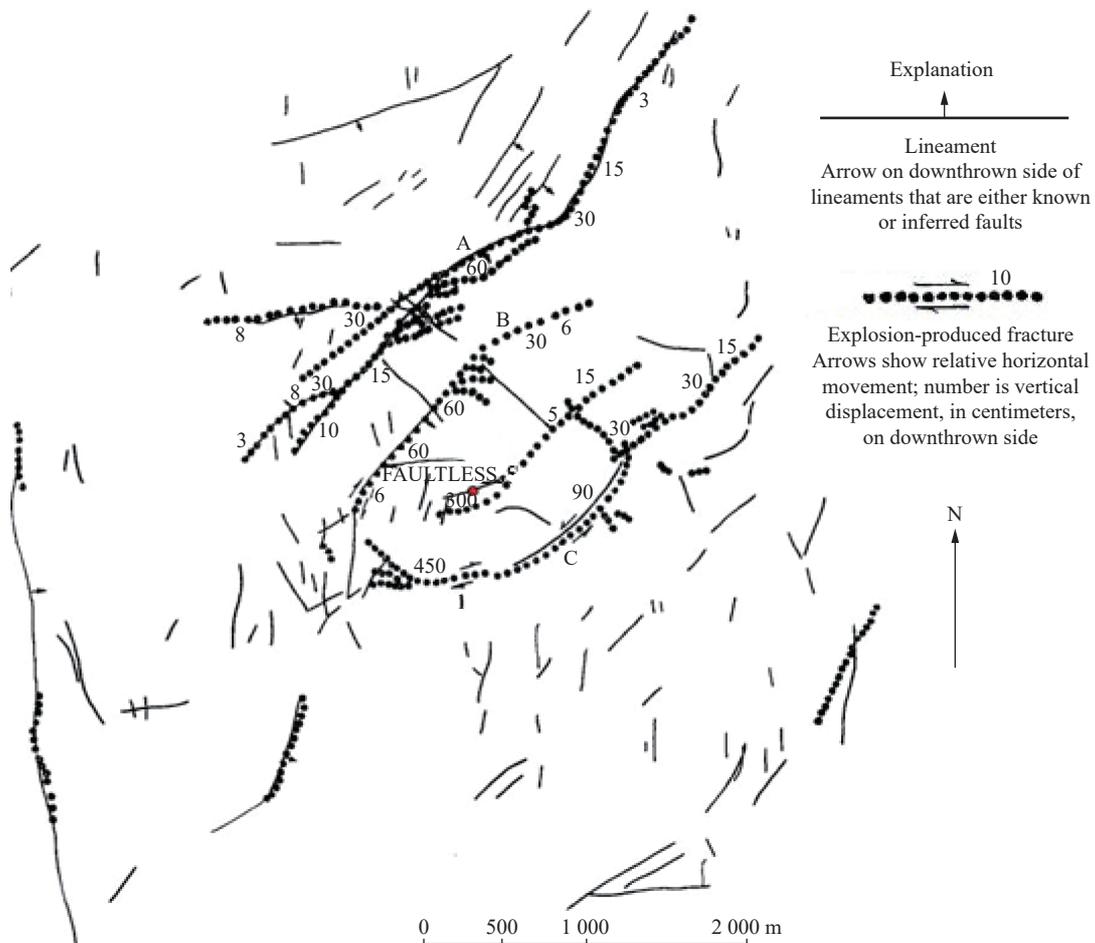


图 7 FAULTLESS 引起地表错动

Fig. 7 Ground motion induced by FAULTLESS

1.4.2 600 m 以外的地表错动

距爆心投影点 600 m 外的主要断裂带包括: (1)地堑两侧边界的延伸部分; (2)爆心投影点东南部 60 m 处断裂带的延伸部分; (3)与线性构造 A 相关联的很长的断裂带系统; (4)在爆心投影点西南方约 1 830 m 处爆炸前存在的线性构造上的断裂带; (5)一处山前断裂带; (6)爆心投影点东南方向一条 2 440 m 长的断裂带。地堑西北边界和东南边界上的断裂带总长分别为 1 980 m 和 2 744 m。地堑中间的断裂带总长为 1 525 m。爆心投影点西南方 1 830 m 处的断裂带没有明显的垂直运动。爆心投影点 600 m 外最明显的断裂为线性构造 A 处断裂带系统。该线性构造为全新世时期由断层形成的位于冲积层上的断崖。内华达试验场中在该种类型断层附近的地下核爆炸都会引起其运动。在此次爆炸中垂直相对位移在端点处几乎不可见, 在中间达到最大值 60 cm。右旋水平位移在个别位置出现。大多数的位移出现在一条主要断裂带上, 其余位移很少或没有的断裂带与主要断裂带平行或斜交, 并形成宽 300 m 的区域。两条与 A 斜交的断裂带上最大垂直相对位移为 30 cm。

1.5 BENHAM 核爆炸

1968 年 12 月 19 日, 美国在内华达深 1 402 m 处进行了 BENHAM 爆炸^[15]。岩体介质为凝灰岩, 当量 1 100 kt。最远地表位移出现在距爆心投影点 11.6 km 处。爆炸所引起最长裂缝为 9.0 km, 爆炸震级为 6.1 级。

爆炸后的 6 个星期内, 在距爆心投影点 12.9 km 范围出现 10 000 余次微弱余震, 其中 640 处绘于图 8 内用并小叉表示。图中细线表示已知断层, 粗线表示出现位移的断层。在爆心投影点附近地表位移大都出现在已有断层附近, 其中最大垂直相对位移为 0.46 m, 出现在爆心投影点北部 2.41 km 与 4.02 km 处。其他地区会出现更大的位移, 但在断层附近的垂直相对位移大都小于 0.3 m。这些位移虽不连续, 但能绵延长达数公里。

爆炸引起的地表加速度见图 9^[14], 地表振动最大幅值与振动周期之比见图 10, 其坐标轴意义分别与图 4、图 6 相同。

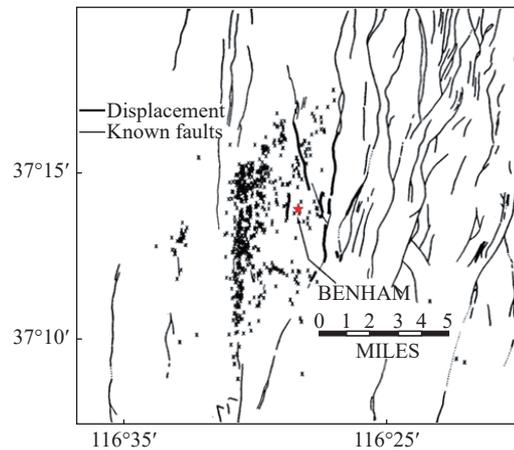


图 8 BENHAM 引发其中 640 处余震及断层位移分布
Fig. 8 Location of 640 aftershocks and faults induced by BENHAM

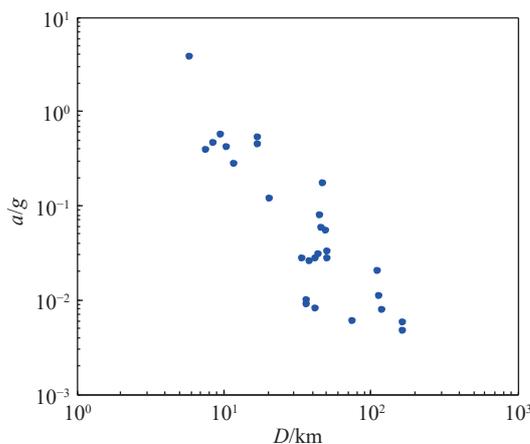


图 9 BENHAM 引起地表最大加速度
Fig. 9 Maximum ground acceleration induced by BENHAM

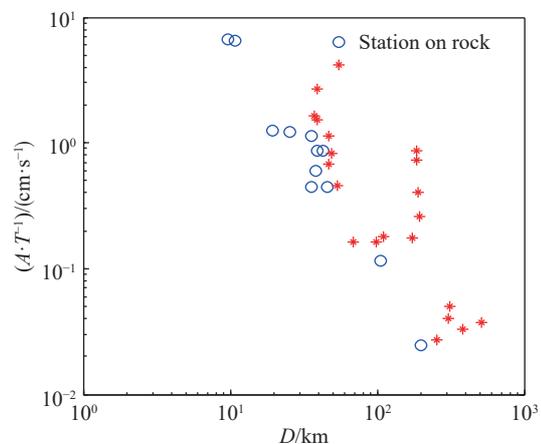


图 10 BENHAM 引起地表振动最大速度
Fig. 10 Maximum ground velocity induced by BENHAM

1.6 MILROW 和 CANNIKIN 核爆炸

1969 年 10 月 2 日, 美国在位于阿留申群岛的 Amchitka 岛深 1 219.2 m 处进行了 MILROW 核爆炸, 爆炸当量为 1 000 kt, 介质为枕熔岩。爆炸激活断层长度为 0.3~8.0 km, 沿断层垂直相对位移为 1.0~1.2 m, 水平相对位移为 0.15 m^[5]。

该群岛位于地球上地震最频繁的区域之一^[15]。爆炸形成的空腔及其上方“烟囱体”在 37 h 后完全塌陷。12 个地质构造活动被记录^[16], 其中 10 个发生在爆炸后 41 d 内, 所有活动的震级均小于 3 级。图 11 为爆心经纬度坐标及附近地形, 爆炸引发地质活动在图中用圆圈表示。

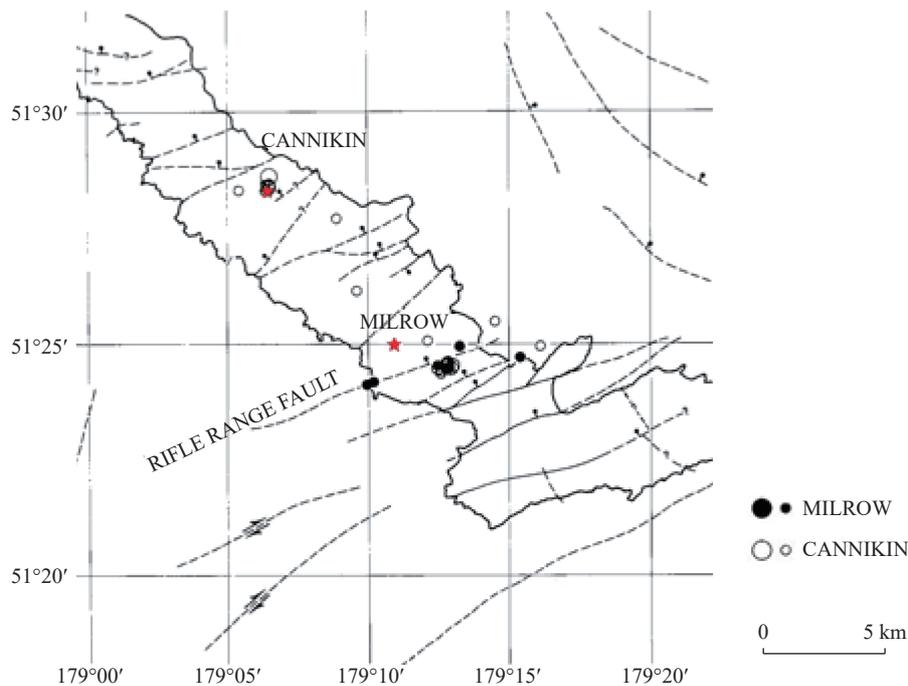


图 11 MILROW 与 CANNIKIN 位置及附近地形

Fig. 11 Location of MILROW and CANNIKIN and nearby terrain

1971 年 11 月 6 日在 Amchitka 岛下方 1 790.7 m 处进行了 CANNIKIN 核爆炸, 当量“小于 5 000 kt”^[15]。爆炸引起的空腔及其上方“烟囱体”在 38 h 内完全塌陷。爆炸后记录到 22 个构造活动, 除了其中一个, 其余所有都在爆炸后 23 d 内发生, 所有活动震级均小于 4 级。

1.7 朝鲜 NKNT 6 核爆炸

朝鲜于 2017 年 9 月 3 日进行了 NKNT 6^[17] 地下核爆炸, 地点为朝鲜北部丰溪里试验场万塔山下。根据美国地质调查局与中国地震台网监测显示, 此次爆炸震级约为 6.3 级, 远大于朝鲜自 2006 年以来的前 5 次地下核试验。

南洋理工大学利用德国航天局 TerraSAR-X 卫星监测了核爆炸前后地表的变化(图 12)。监测显示, 核爆炸导致万塔山较陡峭的西侧和南侧向外位移 3~4 m, 产生的不可逆位移范围约为 9 km²。根据地表位移推算得此次核爆炸当量约为 120~304 kt, 爆源位置为 129.078°E/41.300°N±50 m, 海拔 (1750±100) m, 即万塔山顶下方 (450±100) m 处。

1.8 其余爆炸数据

除了上述被详细介绍的地下核爆炸试验, 尚有许多未被详细描述爆炸试验, 其数据散见于各文献, 集中汇总如下。

表 1^[13] 为在内华达试验场其他几次试验中爆炸规模与最大激活断层长度的统计。

此外, 另有表 4~6 以及图 14 见下文。

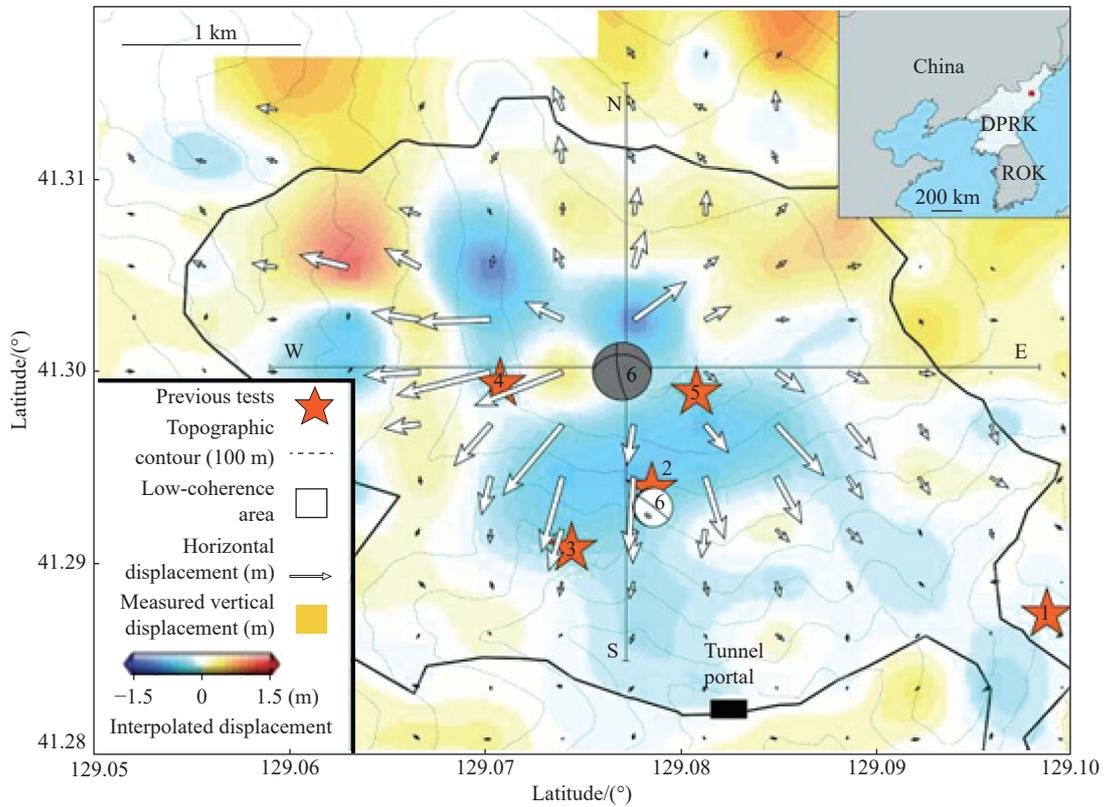


图 12 朝鲜核爆前后地表变形场

Fig. 12 Deformation field before and after NKNT 6

表 1 爆炸规模与最大断层长度

Table 1 Magnitude of explosions and maximum length of active faults

爆炸名称	当量/Mt	震级/ m_b	最大激活断层长度/km
SCOTCH	0.15	5.4	1.54
CHARTREUSE	0.07	5.1	1.66
HALFBEAK	0.30	5.9	3.06
STINGER	—	5.3	2.61
LONGSHOT	—	6.1	2.25

2 地下核爆诱发工程地震的范围、临界阈值

从上述地下核爆现场数据可以看出,地下核爆炸在距离爆心很远($r/Q^{1/3}=(600\sim 1200)\text{ m/kt}^{1/3}$, r 为距爆心距离, Q 为爆炸当量)的距离上诱发了工程性地震。按地下核爆炸地冲击波的试验监测结果,地下核爆炸时,应力波强度随距爆心距离的增加按 r^{-n} 速率衰减^[11]:

$$\sigma = \rho c_p v, \quad v = A(r/Q^{1/3})^{-n} \quad (1)$$

式中: σ 为波前的应力, v 为质点速度, ρ 为介质密度, c_p 为介质纵波波速, A 和 n 为系数,可由试验检测得到。Radionov 等^[7] 基于大量地下核爆炸试验,给出不同岩石中 A 、 n 统计值见表 2。

对于 100 万吨量级地下核爆炸,当介质为花岗岩时,其在 $r/Q^{1/3}=(600\sim 1200)\text{ m/kt}^{1/3}$ 距离上的应力为 1~3 MPa,远小于岩石的破裂强度。

在如此小的扰动应力作用下,岩体介质本身不会产生破坏,介质中出现的不可逆现象与现实岩体的块状构造体系有关,这种破坏表现为软弱夹层两侧块体的相对不可逆位移与转动。在自然状态下,岩体

中的地应力可分为自重应力与构造应力, 其中自重应力是上部岩体在重力作用下对下部岩体产生的应力, 而构造应力主要是由于板块之间的相互挤压, 以及随之产生的地形、地势等因素引起的应力^[18]。即使在深部岩体中构造应力也可以大于自重应力。在地应力作用下, 深部岩体块体之间的软弱面存在内应力, 但在摩擦力及粘结力

作用下尚未发生位移, 此时岩体介质存储有应变能。当有应力扰动经过时, 会产生两种效应: 为软弱面提供了附加剪应力; 出现超低摩擦效应导致接触面摩擦力减小^[19]。正是由于这两种效应的作用, 使原本不会发生位移的软弱面发生了不可逆变形, 同时介质应变能释放, 若释放的应变能很大, 则会形成工程性地震。块系构造介质的变形主要由块体的变形及块体之间软弱夹层的变形组成, 因此在爆炸远区, 扰动应力很小时岩体的变形主要集中于块体边界及强度软弱区, 变形的大小与初始内应力的大小有关, 初始内应力越大, 则扰动释放的能量越多, 产生更大的不可逆位移。根据岩体的具体块体系列及块体之间夹层强度大小, 局部的破坏可能在 10^3 m/kt^3 的距离上发生。已知的块系尺度规律表明, 自然岩体中块系构造是普遍存在的, 若某一岩体不包含地质断层, 则其在更大的尺度上一定具有强度软弱带, 并且不可逆变形的大小与发生破坏的块系尺度水平是对应的。

在确定由地下核爆炸引起的岩体介质变形区范围时, 必须考虑 10^3 m/kt^3 距离上可能会出现局部不可逆变形。

不可逆变形区半径 r_d (以爆心为球心) 的确定过程如下: 把岩体理解成由若干线性尺寸为 L 的构造单元组成的整体。构造单元即为组成块系的单位块体, 其可以在很大程度进行自由的空间运动。如果爆炸作用引起的变形不超过临界值 ε_* , 就不会产生不可逆变形。在块系介质中最大变形发生在软弱面附近, 因此极限变形的尺寸可取 $\varepsilon = u_0/L$, 这里 u_0 为邻近块体面之间的相对位移。不可逆变形区可由下式确定^[20]:

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

式中: B 与 m 同样为场地试验确定的参数。

为了获得具体数值, 必须给出 ε_* 的数值。可以把现实的岩体看成是存在时间很长的非平稳系统, 作为 ε_* 的最小估计值, 可以取地壳在自然变形过程中达到的数值。根据潮汐运动及其他地质构造运动中积累的众多资料, ε_* 可以取为 $(1 \sim 2) \times 10^{-5}$ ^[11]。

也可以借助于介质中不可逆位移发生时的质点速度来确定不可逆位移的范围。王明洋等^[21]分析了介质中质点速度与能量的关系, 首次提出用无量纲能量因子确定岩块不可逆位移的边界范围:

$$\frac{r_d}{Q^{1/3}} = \varphi \cdot k_d^{\frac{-1}{2n}}, \quad \varphi = \left(\frac{A}{c_p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$k_d = \frac{v}{c_p} = \frac{W}{Mc_p^2} \quad (4)$$

$$k_d = \varepsilon_*^2 \quad (5)$$

式中: k_d 为特征能量因子, W 为爆炸扰动能量, M 为岩石块体质量。

将地下核爆炸试验测得的地表质点运动速度代入式 (4), 求得特征能量因子 k_d 后代入式 (3) 即可确定不可逆变形区半径, 结合爆炸埋深利用勾股定理可求得地表的不可逆变形范围。

k_d 的物理意义是在爆炸作用下单位体积岩石的能流密度, 在不可逆变形边界处的 k_d 即为岩体发生不可逆位移的阈值。在实际爆炸中, 利用地表不可逆位移范围及爆炸埋深可求得 r_d , 代入式 (3) 即可求得作为阈值的特征能量因子 k_d 。

表 2 不同岩石的 A 、 n 取值

岩石类型	A	n
花岗石	$(1.0 \sim 1.3) \times 10^4$	1.6~1.75
盐岩	$(0.8 \sim 1.0) \times 10^4$	1.6
凝灰岩	$(0.3 \sim 0.4 \times 10^4)$	1.6

Table 2 Values of A and n of different rocks

从表 3 中的计算结果可得块体产生位移的临界能量因子范围为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$, 该结果与 Kurlenya 等^[22-23] 基于摆型波理论给出的范围一致, 也与根据式 (5) 得到的结果一致。Adushkin 等^[4] 认为, 当 $k_d \geq (1 \sim 4) \times 10^{-9}$ 时, 整个岩块进入准共振状态。

根据前苏联场地试验数据^[5], 不可逆位移范围为 $650 \sim 1\,400 \text{ m/kt}^{1/3}$, 将表 3 中的 k_d 代入式 (3), 取花岗岩的参数, 可得不可逆位移范围为 $658 \sim 1\,270 \text{ m/kt}^{1/3}$, 与试验结果一致。

表 3 不可逆位移能量因子计算

Table 3 Calculation of irreversible displacement

核爆炸试验	岩性	当量/kt	埋深/m	地表不可逆范围/m	不可逆位移半径/($\text{m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$)	ν	k_d
Greely	沸石凝灰岩	825	1 215	5 200	570	0.16	4.9×10^{-10}
Duryea	流纹岩	65	547	790	239	0.63	8.0×10^{-9}
Boxcar	沸石凝灰岩	1 200	1 160	6 100	584	0.15	4.6×10^{-10}
Benham	凝灰岩	1 100	1 400	13 000	1 260	0.04	1.6×10^{-10}
Milrow	枕熔岩	1 000	1 219	8 000	809	0.09	1.6×10^{-10}

3 地下核爆炸激活岩块尺度大小

爆炸引起不可逆位移与激活块体尺寸是相对应的, 且根据式 (2), 不可逆位移范围也与之有关。为研究在距爆心不同距离上激活块体尺寸的规律, 前苏联在长的地下坑道中进行了相应观测。

表 4^[10] 为前苏联地下爆炸试验中在坑道中测得的块体尺寸。

从试验资料可以看出, 随着距爆心距离增大, 激活块体尺寸有增大的趋势, 即在远处有可能诱发大的断层位移。当大尺寸块体被激活时, 其内部的小尺寸块体同样被激活。确定激活块体尺寸可以帮助在地下工程选址时避开有可能被激活的不连续构造。

表 4 爆炸激活块体尺寸

Table 4 Dimension of block that became more active due to explosive action during explosions

爆炸当量/kt	距爆心投影点距离/m	激活块体尺寸/m	爆炸当量/kt	距爆心投影点距离/m	激活块体尺寸/m
2.3	60	11	1.4	150	12
12.5	110	35		165	15
1.4	120	25	17	430	80
11	100	12		500	62
3	90	15		560	55
	100	12		625	78
	110	12		680	40
	120	11	78	800	100
	130	18		900	100
	140	15		1 020	155
	150	10	54	750	80
	155	10		800	70
	190	10		900	115
1.4	110	16		1 000	100
	125	8		1 100	90
	135	14			

图 13^[5] 为前苏联某测试场布置图。a 为 Kalba-Chingiz 断层, I、II 分别为 3#、4#测量区, 布置有测量仪器。编号为 1 至 4 的圆孔为核爆炸孔, 试验编号分别为 1352、1350、1348 及 1346。3#及 4#测得数据见表 5 及表 6, 其中 $D/Q^{1/3}$ 为地表距爆心投影点距离与爆炸当量开立方之比, $S/Q^{1/3}$ 为块体位移与爆炸当量开立方之比。

表 5 3#测量区数据

Table 5 Results of light distance measurements at Site 3#

试验	试验日期	距离 D/m	$(D \cdot Q^{-1/3}) / (m \cdot kt^{-1/3})$	位移 S/mm	$(S \cdot Q^{-1/3}) / (mm \cdot kt^{-1/3})$
1348	1987.08.02	1 700	398	19.5	4.56
1350	1988.09.14	3 500	674	12	2.31
1346	1988.12.17	3 900	890	14	3.19
1352	1989.07.08	5 700	1 743	8	2.45
1410	1989.09.02	~7 000	4 000	2	1.07

表 6 4#测量区数据

Table 6 Results of light distance measurements at Site 4#

试验编号	试验日期	距离 D/m	$(D \cdot Q^{-1/3}) / (m \cdot kt^{-1/3})$	位移 S/mm	$(S \cdot Q^{-1/3}) / (mm \cdot kt^{-1/3})$
1348	1987.08.02	3 700	866	6.66	1.56
1350	1988.09.14	1 450	279	19.7	3.8
1346	1988.12.17	6 650	1 518	5	1.14
1352	1989.07.08	2 900	887	3.5	1.07

图 14^[5] 为地下核爆炸试验中标准化距离与激活块体尺寸之间的关系, 数据来自前苏联与美国的地下核爆炸试验。横坐标为爆心投影点距离与爆炸当量开立方之比, 纵坐标为激活块体尺寸与爆炸当量开立方之比。

激活块体尺寸可用下式计算^[24]:

$$\frac{L}{Q^{1/3}} = A' \left(\frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{m-n}, \quad A' = \frac{2ABk_2}{\pi c_p \zeta k_1 (1+k_2)} \quad (6)$$

式中: $\zeta=10^{-2} \sim 10^{-1}$ 为间隙填充物质的极限压缩系数, k_1 、 k_2 为 Sadovsky 块系构造理论中的岩体不变量。利用式 (6) 对图 14 中的数据进行拟合得到 $A' \approx 0.105$, $m-n \approx 1.04$ 。

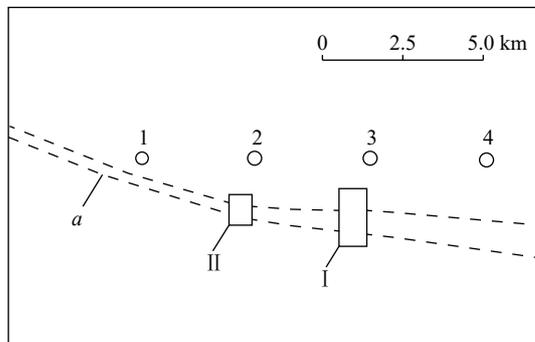


图 13 测试场布置图
Fig. 13 Test site layout

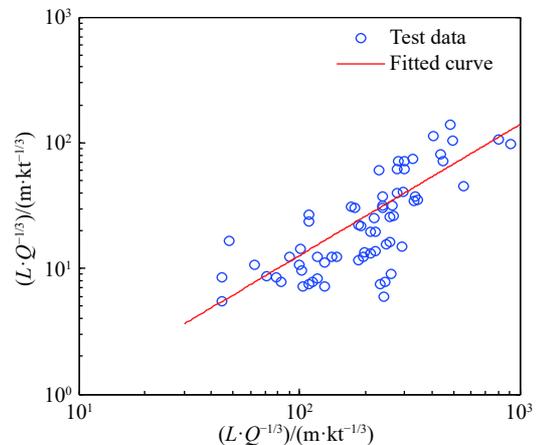


图 14 标准化距离与块体尺寸关系
Fig. 14 Scaled size of blocks activated by a nuclear explosion

4 结 论

(1)在扰动应力远低于岩石介质强度的爆炸远区,岩体会发生工程性地震导致的不可逆位移,这种位移是由于自然岩体块系构造中的断层及块体间隙两侧岩体积的内应力在扰动作用下释放而导致的,主要集中于块体边界及强度软弱区。

(2)根据试验数据可以确定不可逆位移半径 r_d 以及发生不可逆位移的特征能量因子 k_d 的阈值。当特征能量因子大于阈值时将发生不可逆位移,计算得阈值为 $10^{-9}\sim 10^{-10}$ 。

(3)任何岩块都在某一尺度的块系构造内,应力扰动在不同距离上激活的块体尺寸不同,随距离增大,激活块体尺寸增大。

参考文献:

- [1] 徐开礼,朱志澄. 构造地质学 [M]. 2版. 北京:地质出版社,1989.
- [2] HILL D P, REASENBERG P A, MICHAEL A, et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 landers, California, earthquake [J]. *Science*, 1993, 260(5114): 1617–1623. DOI: 10.1126/science.260.5114.1617.
- [3] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题 [R]. 南京:解放军理工大学工程兵工程学院,2004.
- [4] ADUSHKIN V V, OPARIN V N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeadia: part iii [J]. *Journal of Mining Science*, 2014, 50(4): 623–645. DOI: 10.1134/S1062739114040024.
- [5] Adushkin V V, Spivak A. Underground explosions[R]. WGC-2015-03, 2015
- [6] ADUSHKIN V V, SPIVAK A A. Changes in properties of rock massifs due to underground nuclear explosions [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2004, 40(6): 624–634. DOI: 10.1023/B:CESW.0000048263.34894.58.
- [7] RODINOV V, ADUSHKIN V, KOSTUCHENKO V, et al. Mechanical effect of an underground explosion [M]. Moscow: Nedra, 1971.
- [8] KOCHARYAN G G. Experimental investigations on the dynamic deformation of underground excavations in rock [C] // 2nd North American Rock Mechanics Symposium. USA: American Rock Mechanics Association, 1996.
- [9] KOCHARYAN G G, BRIGADIN I V, KARYAKIN A G, et al. Failure of underground workings in rock of block structure under the action of dynamic forces: I: experimental data on the failure mechanics of real rock under the action of powerful explosions [J]. *Journal of Mining Science*, 1994, 30(4): 370–378. DOI: 10.1007/BF02048182.
- [10] KOCHARYAN G G, SPIVAK A A. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions: Part i: experimental data [J]. *Journal of Mining Science*, 2001, 37(1): 64–76. DOI: 10.1023/A:1016736919590.
- [11] KOCHARYAN G G, SPIVAK A A, BUDKOV A M. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions: part ii: estimates by analytical models, numerical calculations, and comparative analysis of theoretical and experimental data [J]. *Journal of Mining Science*, 2001, 37(2): 149–168. DOI: 10.1023/A:1012327627277.
- [12] NIKOLAEV A V. Distant aftershocks of earthquakes and underground nuclear explosions [J]. *Reports of Russian Academy of Science*, 1999, 364(1): 110–113.
- [13] MCKEOWN F A, DICKEY D D. Fault displacements and motion related to nuclear explosions [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1969, 59(6): 2253–2269.
- [14] CLOUD W K, CARDER D S. Ground effects from the boxcar and benham nuclear explosions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1969, 59(6): 2371–2381.
- [15] GLASSTONE S, DOLAN PHILIP J. The effects of nuclear weapons [M]. USA: U.S. Atomic Energy Commission, 1977.
- [16] ENGDAHL E R. Seismic effects of the milrow and cannikin nuclear explosions [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1972, 62(6): 1411–1423.
- [17] WANG T, SHI Q, NIKKHOO M, et al. The rise, collapse, and compaction of Mt. Mantap from the 3 September 2017 North Korean nuclear test [J]. *Science*, 2018, 361(6398): 166–170. DOI: 10.1126/science.aar7230.
- [18] 陈宗基,吴海青. 我国在复杂岩层中的巷道掘进:兼论构造应力与时间效应的重要性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1988, 7(1): 1–001. DOI: 10.3321/j.issn:1000-324X.1999.03.022.

- CHEN Zongji, WU Haiqing. Yunnelling in complex rock formations in China: importance of geotectonic stress and time effects [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1988, 7(1): 1–001. DOI: 10.3321/j.issn:1000-324X.1999.03.022.
- [19] KURLENYA M V, OPARIN V N. Problems of nonlinear geomechanics: part ii [J]. *Journal of Mining Science*, 2000, 36(4): 305–326. DOI: 10.1023/A:1026673105750.
- [20] 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 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 685–691. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0685-07.
- WANG Mingyang, LI Jie, QIU Yanyu, et al. Calculation method for irreversible deformation region radius under large-scale underground explosion based on law of energy [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 685–691. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0685-07.
- [21] 王明洋, 李杰. 地下核爆炸诱发工程性地震的计算原理及深地防护 [J]. *岩石力学与工程学报*, 已录用.
- WANG Mingyang, LI Jie. The calculation principle of engineering seismic effects induced by underground nuclear explosion and deep underground protection[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, accepted.
- [22] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I. Pendulum-type waves: part ii: experimental methods and main results of physical modeling [J]. *Journal of Mining Science*, 1996, 32(4): 245–273. DOI: 10.1007/BF02046215.
- [23] KURLENYA M V, OPARIN V N, VOSTRIKOV V I, et al. Pendulum waves: part iii: data of on-site observations [J]. *Journal of Mining Science*, 1996, 32(5): 341–361. DOI: 10.1007/BF02046155.
- [24] 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 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1271–1277. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0201.
- LI Jie, CHEN Wei, SHI Cuncheng, et al. Calculation method of irreversible deformation region radius under large-scale underground explosion based on block hierarchical structure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1271–1277. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0201.

Analysis of test data of underground nuclear explosions and calculation of irreversible deformation range

XU Tianhan¹, LI Jie^{1,2}, WANG Mingyang^{1,2}, XU Xiaohui^{1,2}, HE Wenjing³

(1. State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

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

3. Academy of the Rocket Force, Beijing 100094, China)

Abstract: The huge energy released instantaneously in underground nuclear tests leads to a chain reaction of crustal energy, and results in geophysical phenomena such as induced earthquakes. This paper sorts out and sums up the underground nuclear test data of the Soviet Union and the United States conducted in the 20th century, including the range of engineering earthquakes induced by underground nuclear tests and the size of activating rock blocks. By judging the measured data, the mechanical nature of the engineering earthquake induced by underground nuclear explosion is pointed out and the range of the critical energy factor of irreversible displacement induced by underground nuclear explosion is calculated using the theoretical formula, thereby providing a theoretical basis and site effect test data for relevant researches.

Keywords: underground nuclear explosion; engineering earthquake; irreversible displacement range; characteristic energy factor; activated rock block

(责任编辑 王易难)