

核爆炸地震学概要

吴忠良 陈运泰 牟其铎



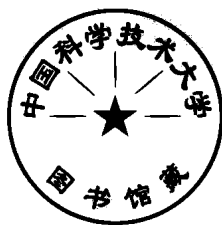
地震出版社

国家地震局地球物理研究所

科研论著编号 94A0068

核爆炸地震学概要

吴忠良 陈运泰 牟其铎



地震出版社

1994

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本书介绍了核爆炸地震学的基本概念,涉及与核爆炸的地震效应有关的物理过程、一般地震震源(包括天然地震的震源和爆炸源)的地震学描述、地震矩张量的基本概念、地下核爆炸事件的震源特性、核爆炸记录的主要特点、鉴别地下核爆炸的地震学判据等内容;还给出了与现代地震学有关的一些知识,包括数字地震记录的物理意义、实时地震监测的基本概念、震源性质的几何表示等。

本书试图以 80 年代以来现代地震学的新的发展为基础,系统地介绍核爆炸地震学的基本概念和基本理论框架,可供地球物理、核物理及军事科学方面的专业技术人员参考,也适于物理学、地球物理学、科技信息工作和软科学方面的科研、教学人员、学生和管理人员阅读。

核爆炸地震学概要

吴忠良 陈运泰 牟其铎

责任编辑:杨懋源

责任校对:徐雁生

地质出版社出版

北京民族学院南路 9 号

中国地质大学轻印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 4.5 印张 120 千字
1994 年 8 月 第一版 1994 年 8 月第一次印刷
印数 0001—1000

ISBN 7-5028-1147-8/P·691

(1540) 定价: 7.80 元

目 录

第一章 核爆炸与核爆炸地震学.....	(1)
第二章 地下核爆炸源的物理状况.....	(6)
一、引言	(6)
二、地下核爆炸初始阶段的非线性过程	(9)
三、作为一种震源的地下核爆炸	(12)
四、震源表示定理	(15)
第三章 一般地震震源的定量描述: 地震矩张量	(19)
一、地震矩张量的弹性动力学问题	(19)
二、几类典型震源的地震矩张量	(23)
三、地震矩张量的张量几何学问题	(27)
四、地震矩张量反演	(30)
第四章 等效震源的地震学性质	(35)
一、核爆炸的等效震源的震源时间函数	(35)
二、弹性半径上的压力	(40)
三、非球对称分量	(44)
四、核爆炸当量的估计	(45)
第五章 核爆炸事件的地震图分析	(47)
一、引言	(47)
二、不同震中距离的核爆炸记录	(52)
第六章 鉴别地下核试验的地震学方法	(83)
一、引言	(83)
二、鉴别地下核试验的地震学判据	(85)
三、逃避核查的技术手段	(93)

附录 I	数字地震记录的意义	(95)
附录 II	用于 GSETT 项目的台站分析软件 —— ARS 简介	(99)
附录 III	震源性质的几何表示	(105)
附录 IV	1975—1991 年部分核试验目录	(112)
附录 V	主要名词术语	(130)
参考文献		(134)
后记		(137)
英文目录		(139)

第一章 核爆炸与核爆炸地震学

按照爆炸所处环境的不同，主要用于军事目的的人工核爆炸大致上可分为五类：地下爆炸、水下爆炸、地面爆炸、大气层爆炸、外层空间爆炸。其中地下核爆炸主要用于核武器试验，军事上也可以通过地下核爆炸以污染的形式造成障碍，或者破坏交通枢纽和桥梁。核爆炸地震学的研究对象主要是地下核爆炸、水下核爆炸和地面核爆炸，其中以地下核爆炸为主。作为地震学的一个分支学科，核爆炸地震学使用地震学的观测手段和理论方法，研究与核爆炸的地震效应有关的理论和观测问题，通过地震学手段进行地下核爆炸的监测和核爆炸的物理性质的研究，并利用核爆炸这一已知的、相对来说较为简单的震源进行针对地球内部结构和天然地震的震源过程的地震学研究。

核武器(这里主要指原子弹和氢弹)在决定战争结局的各种因素中实际上处于很不重要的地位，这一论断在 30 年前还仅仅是少数军事家的远见卓识，而今天几乎已成为一个众所周知的常识。即使单纯从作战的角度说，与常规武器比较，核武器也有很多明显的缺点：(1) 核武器的使用往往会带来强烈的放射性污染，从而给袭击后作战带来严重障碍；(2) 核武器在摧毁军事目标的同时也很容易造成大量的平民伤亡和城市破坏；(3) 核武器的使用往往伴随着复杂的政治和外交问题，由此而付出的政治上的代价远远超出其军事上的收益。因此，世界各国在核武器的研制和使用上都不得不持非常谨慎的态度。然而另一方面，由于核武器所特有的巨大的杀伤力和破坏性，核裁军问题一直是科学家、各国政府以及社会公众普遍关注的问题。

第一颗原子弹是1945年7月16日在美国新墨西哥州爆炸成功的。迄今为止，付诸实战的核爆炸只有两次，即1945年8月6日和9日在日本广岛和长崎进行的爆炸。这两次爆炸加速了战争的结束，却也付出了10.6万平民死亡、12.8万平民受伤的代价。

1949年8月29日，苏联成功地爆炸了它的第一颗原子弹。英国第一颗原子弹爆炸于1952年10月3日。1952年10月31日，美国爆炸了第一颗氢弹。1953年8月12日，苏联第一颗氢弹也随之爆炸成功。1964年10月16日，中国第一颗原子弹爆炸成功。1967年6月17日，中国又成功地进行了氢弹爆炸实验。

1946年7月24日，美国在比基尼珊瑚岛附近洋面以下约30 m(90英尺)处进行了第一次水下核爆炸。这次爆炸在距离为69.0—78.6°之间的8个地震台上留下了清晰的记录。利用这些记录，Gutenberg, Richter 和 Bullen 等进行了可能是最早的核爆炸地震学研究。1954年2月28日的一次1500万吨(指TNT当量，下同)地面爆炸的地震记录，证实了在震中距小于142°时可以将PKIKP波和衍射波清楚地分离开来，从而地球内核的存在成为无可争议的结论。这是核爆炸地震学对地震学基础研究的第一个、可能也是最重要的贡献。

1957年9月在多伦多召开的国际大地测量与地球物理学联合会(IUGG)会议上，Bullen做了题为《原子时代的地震学》的报告。公开发表的9月19日内华达试验场一次核爆炸的地震观测结果在地震学界和社会公众中引起强烈反响。地震学家Bath写道：“世界上许多地震研究所成了社会公众空前关心的对象”。从某种意义上也许可以认为，这是作为一门独立的分支学科的核爆炸地震学的开始。1958年8月20日，由若干国家的代表组成的日内瓦委员会提交了一份关于核爆炸监测问题的报告，在这份报告中，地震方法占有重要的位置。1963年苏、美、英三边部分禁止核试验条约(LTBT)的签订，使核武器试验主要以地下核试验的方式进行。这就使核爆炸地震学在核爆炸监测中开始具有愈加重要的意

义。1968年，斯德哥尔摩国际和平研究所(SIPRI)邀请一些国家的地震学家系统地讨论了地震核查问题，在许多关于地震核查能力的评估问题上取得了一致，但仍有一些不同意见。

1959年，Latter等提出用于逃避核查的解耦方法，认为通过空腔解耦可以大大降低核试验的视当量。用体波和面波震级比来区分天然地震和地下核爆炸的方法也是50年代末、60年代初核爆炸地震学研究的一个重要的进展。为了提高地下核爆炸试验的地震监测能力，从1959年开始，美国国防高级研究计划局(DARPA)开始执行VELA地震观测计划。1961年，美国海岸与大地测量局(USC & GS)安装了世界范围标准地震台网(WWSSN)的第一个台站，由阿尔伯克基地震实验室(ASL)负责安装和维护的这—世界标准地震台网于1967年完成。它分布在60个国家，共125个台站，被认为是地震观测史上最重要的进展之一。世界范围标准地震台网的建立提高了全球范围内的地震监测水平，为震源物理和地球内部结构的研究提供了前所未有的观测条件，并为60—70年代新的全球大地构造学说的建立和发展做出了贡献。核爆炸地震监测的社会需要客观上大大地促进了地震学本身的发展。

1965年6月，用于探测地下核试验的大孔径地震台阵——LASA在美国蒙大拿州开始运行。1966年12月，美国在密西西比州进行了第一次解耦实验。1968年4月26日在内华达州进行的120万吨级核试验使地震学家提出地下核爆炸可以触发地震的想法。1970年10月14日由苏联核试验产生的P'650P'震相给出了地幔中650km间断面存在的明确的证据。70年代末、80年代初，大量的研究成果使地震学家得出这样的结论：(1)对于天然地震和地下核爆炸，看来并不存在一个理想的、十全十美的鉴别判据；(2)也不存在一个理想的逃避核查的方法，换句话说，从地震学的观点看，要进行不惊动地震观测系统的“安静的”地下核试验或者地震观测系统无法识别的“干净的”地下核试验原则上也是不可

能的；(3) 运用核爆炸地震资料，可以得到很多对地震学基础研究有重要参考价值的结果；(4) 随着地震学观测与研究的进步，对于核爆炸的探测和研究水平将会越来越高。

世界范围标准地震台网的成功和 70 年代以来微电子技术在地震科学中的广泛应用，使地震学家从 70 年代就开始考虑在全球范围内进行地下核爆炸试验的准实时监测的可能性。联合国裁军谈判委员会 1976 年 7 月决定成立“审议关于检测和识别地震事件的国际合作措施特设科学专家小组”。专家小组于 1984 年组织了第一次全球地震核查试验(GSETT-I)，1988—1992 年又组织进行了第二次全球地震核查试验(GSETT-II)。为此而发展起来的设备和软件为实时地震观测提供了经验。80 年代以来，实时地震学开始受到地震学家和社会的关注，并逐步在减轻地震灾害的社会努力中发挥重要作用。核爆炸地震监测工作对实时地震学的贡献则成为核爆炸地震学促进地震学本身的发展的又一个例证。我国于 1991 年参加了第二次全球地震核查试验。GSE 项目在北京、兰州、海拉尔设立三个台站，在北京设立国家数据中心(NDC)。1992 年，中国 GSE 系统并入中国数字地震台网(CDSN)。

从核爆炸监测的角度讲，核爆炸地震学的价值在于：在无法接近核试验场、并且关于地下核爆炸的信息处于高度保密状态的情况下，它是了解他方进行的地下核试验的最有效的、有时甚至是唯一有效的技术手段，这也是核爆炸地震学得到各方面的高度重视的原因。然而另一方面，对于针对实战的核爆炸探测来说(这种探测通常有三个同等重要的目的，一是对对方的核袭击做出快速反应；二是测定我方进行核反击的效果；三是对其他地区使用核武器的情况做出快速反应)，与其他物理方法相比，地震方法则是实战价值最低的方法。如上所述的优势和不足决定了核爆炸地震学更多地具有“和平的”性质。

70 年代以来，越来越多的人力物力转向高技术常规武器已成为世界各国国防建设的一个重要的发展趋势，然而与很多人的

想像不同，在这种新的形势下，核战争的危险仍旧是存在的：大量已有的核武器仍在威胁着全人类的安全；核扩散的危险有增无减；小型化技术、效能剪裁技术等高、新科学技术的采用增加了核武器的可控性，为核武器提供了更多的用武之地；高技术的应用大大地提高了常规武器的威力，核武器和常规武器之间差别的缩小也为核武器的使用提供了条件。在这种新的形势下，作为监测地下核试验的一个重要手段，核爆炸地震学在维护国家安全、促进世界和平的政治、外交活动中仍发挥着重要的作用。与此同时，随着时间的推移，大量核试验资料的解密也为作为地震学的一个分支学科的核爆炸地震学的发展创造了条件。

核爆炸的地震学研究与自然地震的地震学研究既有相同点又有明显的不同。作为核爆炸地震学的一个导引，本书重点介绍核爆炸地震学的基本概念。第一章简单地介绍核爆炸地震学和核爆炸地震学发展史中一些重要的“峰值”和“明显初至”。第二章介绍与核爆炸的地震效应有关的物理过程。第三章介绍一般地震震源（包括天然地震的震源和爆炸源）的完整描述——地震矩张量。第四章进一步介绍作为一种震源的地下核爆炸事件的一些重要的物理性质，关于这些性质的知识是更为深入和细致的研究（例如使用合成地震图进行的研究）的最低限度知识。在第五章中，我们结合核爆炸事件的实际记录介绍不同震中距上的核爆炸产生的地震图的基本特点。如所周知，地震图在地震学中的作用犹如岩石标本在地质学中的作用。第六章介绍识别地下核爆炸的地震学判据。在附录中，我们还给出了与现代地震学有关的一些知识，这些知识虽然并不是核爆炸地震学的基本内容，但在进一步的研究中却是必不可少的。

第二章 地下核爆炸源的物理状况

一、引言

核爆炸源与化学爆炸源既有相同之处又有明显的不同。除了爆炸当量的差别之外,这两种爆炸源之间最重要的差别是,在爆炸发生的初始阶段,两种爆炸经历了不同的物理过程。然而在爆炸的后续阶段,也就是在产生地震波的阶段,这两种爆炸源几乎是没有差别的。关于化学爆炸源和核爆炸源的地震学性质的差别,目前并未得到一个确定的结果。图 2.1 给出了化学爆炸过程和核爆炸过程的比较。

在作为一次人工地震的地下核爆炸中,几乎同时有三类震源在起作用:一是爆炸本身,二是爆炸引起的构造应力释放,三是爆炸冲击波引起的碎裂。后续的地震信号则一般来自爆炸之后发生的洞穴崩塌和余震过程。

从地震学的角度讲,在爆炸源区附近可以定义一个“弹性半径”,在弹性半径之外,与地震学中经常遇到的情况相似,应力-应变关系可以处理成接近线性的,即在弹性半径之外,地球介质可以看成是接近弹性的;而在弹性半径之内,无论是应力-应变关系还是震源过程都表现出高度的非线性。

原则上,运用地震学的理论和方法,可以从弹性半径处的震源状况出发,通过震源过程、地震波传播和衰减,以及接收台站场地响应的模拟,以正演合成的方式解释地震仪最终接收到的地震信号;也可以反过来从记录到的地震信号出发,用反演的方法反推弹性半径处的震源状况。然而要由此进一步推断弹性半径以

内的非线性的物理过程却是相当困难的，在没有来自其他学科的更多的信息的情况下，仅通过(现在的)地震学方法去推断核爆炸的物理过程则几乎是不可能的。这是核爆炸地震学的局限，然而也是核爆炸地震学的优点。因为一方面这种局限阻碍了通过地震学方法了解核爆炸源的非线性过程，另一方面它却使核爆炸地震学的理论和方法变得十分单纯、简单。

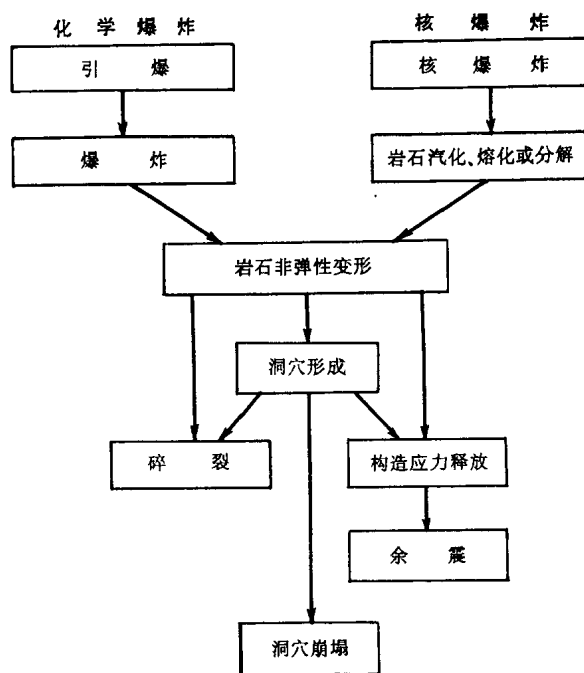


图 2.1 化学爆炸过程和核爆炸过程的比较(据 Rodean, 1981)

同我们在地震学中所了解到的情况一样，爆炸源附近的介质状况对爆炸产生的地震信号有着相当大的影响，从而也对爆炸事件的鉴别和当量估计有着相当大的影响；因此，在相当的程

上,对核爆炸事件的探测水平取决于人们对真实地球介质中地震波的激发、传播和衰减的物理规律的了解。

弹性半径的数量级,定性地,相当于源区的横波波速与由宽频带地震信号反演得到的作为时间函数的地震矩率张量的对称分量的拐角频率之比。对于万吨级试验而言,它一般为公里的数量级。对于一定的爆炸当量以上的爆炸事件,爆炸事件愈小,弹性半径也愈小,从而拐角频率愈大,此时核爆炸事件的高频成分也相应地占有愈加重要的地位,于是在这种条件下,震源附近的小尺度非均匀性开始具有不可忽略的影响。所以,与天然地震的情形相似,“地震”愈小,地震图上与简单介质模型预测的理论地震图不一致的部分起源于介质复杂性的可能性就愈大,而要详细地了解震源过程,就必须首先从地震图中“扣除”这些来自介质复杂性的影响。

通常,由核爆炸产生的能量只有一小部分通过地震波的方式释放。由进入地震波的能量与总能量之比定义的“爆炸地震效率”与爆炸源所处的物理环境有关。对于一般的地下核爆炸,爆炸地震效率的数量级大多为 10^{-3} 。相对说来,爆炸地震效率以水下爆炸为最大,地下爆炸次之,地面爆炸较小,地面以上的爆炸最小。

由于震源附近的地球介质对地震波的传播和衰减具有相当大的影响,由核爆炸事件的震级来推断爆炸当量,所得震级-当量关系显然也是因地而异的。这里,说一次核爆炸事件的震级为 M ,指的是由这次爆炸产生的某个频段内的地震信号,其振幅与一个相同意义上的相同震级的地震产生的相同频段内的地震信号的振幅相同,例如说一次核爆炸事件的体波震级为 m_b ,系指由这次爆炸事件产生的周期为 1 秒左右的体波与一次震级为 m_b 的天然地震产生的周期为 1 秒左右的体波的振幅相同。而说一次核爆炸的当量为 Y ,系指由这次核爆炸产生的冲击波与药量为 Y 的 TNT 炸药产生的冲击波相当。相当于 1 千吨 TNT 炸药的能为 $4 \times 10^{12} \text{J}$ 。关于震级与爆炸当量之间的关系进行过很多研究。作为一个粗略

的数量级概念，如果以 M 表示震级，以 Y (单位为 kt) 表示爆炸当量的话，则近似地有 (Romney 公式)：

$$M \sim \log Y + 3.65$$

也就是说，一次 2 万吨爆炸产生的 P 波与一次 5 级地震产生的 P 波相当。

更一般地，震级与当量之间的关系可以表示为

$$M = a \log Y + b$$

其中， a 、 b 的值不仅与源区和接收台站有关，而且与所讨论的震级范围有关。

二、地下核爆炸初始阶段的非线性过程

核爆炸的过程，主要是瞬时快速产生核辐射与核电磁脉冲，发射强烈热辐射(热和光)，并产生从爆点向外扩散的强压脉冲(冲击波)的过程。核爆炸能量的大致分布为：冲击波占 50%，热辐射占 35%，剩余核辐射占 10%，瞬时核辐射与核电磁脉冲占 5%。

重原子核在裂变成两个几乎相等的碎片时释放出能量， U^{235} 和 Pu^{239} 发生裂变时，除了释放能量之外，还放出几个快中子，这些快中子又去轰击另外的 U^{235} 和 Pu^{239} 核子，从而引起进一步的裂变，再产生更多的中子。只要中子的损失率不超过裂变过程中中子的再生率，这种链式反应就将持续下去。这就是原子弹爆炸的基本原理。

轻原子核在聚变时也会释放能量，最容易进行的聚变反应是氢的两种同位素——氘和氚之间的反应，因此聚变核武器又称为氢弹。氢核克服相互间接近时产生的强斥力通常需要相当于太阳的温度的能量，因此热核装置需要裂变过程作为触发器。氢弹爆炸的过程，则常常是裂变—聚变—裂变的三级反应过程。

在发生核爆炸后的一瞬间，大部分能量是以动能的形式释放出来的，从爆心以很高的速度抛射出的原子“碎片”导致了强大的

冲击波。

1. 爆炸

在化学爆炸和核爆炸中，爆炸的过程首先是通过一次规模较小的爆炸产生可以导致第二次更大的爆炸的条件过程，第一次爆炸一般是在受热的条件下实现的。如果第一次爆炸与用来进行更大的第二次爆炸的物质很接近，那么由第一次爆炸产生的压力冲击波就会触发第二次更大的爆炸。

化学爆炸产生的爆炸气体一般具有相当于几万兆帕的压力和大约 5000 至 6000 开尔文的热力学温度。核爆炸时，爆炸物质则在几十万兆帕和 10^6 开尔文下转化成等离子体。这一过程通常是在几微秒的瞬间内实现的。

2. 岩石汽化

爆炸导致的高温高压产生强烈的冲击波。冲击波的产生是一个不可逆热力学过程，它将热能传递给周围的岩石，这些热能足以使岩石发生汽化。对于一般的无孔隙硅酸盐，二十万兆帕的冲击波即可导致汽化。对于含孔隙的硅酸盐，汽化要求的压力大约是这个压力的 $1/3$ 到 $1/2$ 。有些岩石，例如白云岩，不是熔化或汽化，而是发生分解。

冲击波在地球介质中传播时迅速地衰减，从而传递给周围岩石的热能也随距爆炸中心的距离而迅速地衰减。在十万兆帕以上的压力下汽化的岩石迅速膨胀，形成“洞穴”，并与周围的岩石相互作用，直到洞穴压力和周围岩石的抵抗应力达成平衡为止。压力很大时，在周围的固态岩石中也会因为与冲击压力的加载-卸载有关的非平衡热力学过程而发生固态-固态相变。

3. 洞穴的形成

由汽化岩石所构成的洞穴形成于几万兆帕的压力。在完全“填塞”的情况下，这样的压力直接作用于周围的岩石。这种压力的结果，一是产生使岩石发生非弹性形变的冲击波，二是将周围的岩石向外推挤，以使洞穴发生膨胀。

在岩石汽化的最初阶段，冲击波的传播和洞穴膨胀几乎是同步的。当汽化停止时，冲击波的波前从洞穴边缘“分离”出去，洞穴膨胀和冲击波传播相互独立地进行。

洞穴的动力学性质由洞穴气体的热力学性质、周围岩石的力学性质，以及冲击波的传播性质所决定。洞穴的产生也导致周围岩石介质中的应力状态的变化。

4. 岩石的非弹性形变

在地下核爆炸的情况下，强烈的冲击波从由汽化岩石构成的洞穴向周围的固态岩石中传播。在未做解耦处理的情况下，初始的冲击波压力一般说来数量级为几万兆帕。冲击波向外传播时，由于不可逆热力学过程和几何扩散而迅速衰减。

在足够大的压力下，岩石的剪切应变可以忽略不计，岩石表现出类似于流体的性质。在稍低一些的压力下，剪切应变开始起作用，岩石开始具有塑性。压力更低时，岩石可以发生剪切破裂或张性破裂。含孔隙的岩石在高压下可能被不可逆地压缩，如果孔隙是液体饱和的或者是部分饱和的，则压缩的程度相应地要低一些。

由爆心周围岩石的上述流体—塑性—弹性性质的变化可以定义一个非弹性区，在非弹性区之内，介质形变以非线性的非弹性形变为主，在非弹性区之外，介质形变以弹性和线性非弹性为主。在爆炸过程中，由于冲击波产生和洞穴膨胀所涉及到的物理过程，就其强度而言，远远超出其它所有的物理过程的总和，作为一个相当好的一级近似，可以认为非弹性区是球状的，并相应地定义一个用来描述球状非弹性区大小的弹性半径。

作为一个小结，图 2.2 定性地给出了伴随着地下核爆炸的与核爆炸地震学有关的主要物理过程。

5. 解耦

解耦指的是如果把核爆炸放在一个足够大的空腔中进行的话，爆炸所产生的地震波就会小得多。一些通过小当量爆炸进行

的现场实验表明,这样的方法可以使地震波的振幅减少 1—2 个数量级。这可能是逃避核查的一个有效的方法。

解耦的基本依据是,冲击波在空气中的衰减比在岩石中的衰减快得多。因此,解耦的另外一种等效的方法是在空腔中充填可以使冲击波衰减很快的材料。

按照空腔的大小,解耦可以分为两类:完全解耦,指的是空腔边界对于爆炸的响应是弹性的;部分解耦,指的是空腔边界对于爆炸的响应仍是非弹性的。

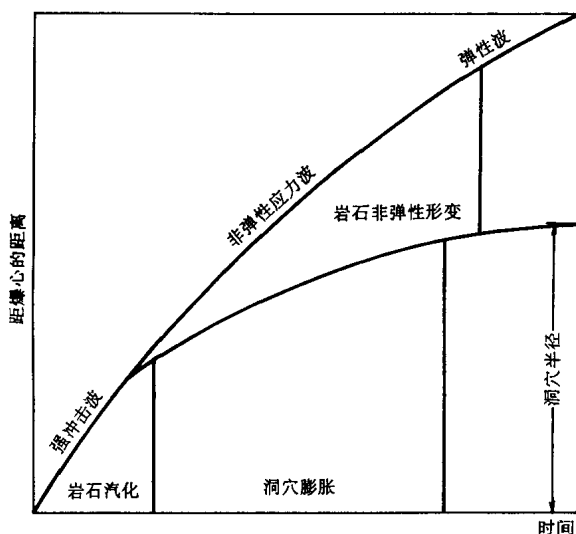


图 2.2 与核爆炸地震学有关的主要物理过程(据 Rodean, 1981)

三、作为一种震源的地下核爆炸

1. 等效震源

在弹性半径之外,地球介质的力学性质以弹性和线性非弹性