前　言

在中国东部沿海地区，各种受保护的建筑物、晒盐池、养殖池、河坝、海堤等地形的地震勘探一直是一项复杂而艰难的工作，主要原因在于复杂地表地区，激发药量一般不能太大，但是又要保持足够的激发能量。在这类地区的地震勘探工作一般采用深井、小药量的激发方式，但是这种方式存在较大的问题。深井的井深一般远远超过了虚反射界面的深度，使得激发效果受虚反射的影响较大，并且深井一般也不能保证合适的激发岩性。小药量一般激发能量较弱，影响了激发的效果。受到两者的共同制约，深井、小药量激发出的地震波一般能量弱、干扰严重、信号频带窄，严重影响到地震勘探效果，特别是浅层勘探效果。

随着地震勘探工作的深入发展，解决这种地区的激发震源问题，已经显得越来越迫切。本书讨论的是各种受保护的建筑物环境下的勘探激发问题。目前，该区域激发主要采用两种震源，一是炸药震源（包括各种聚能震源），二是机械的可控震源。这两种不同方式的激发震源，目前均存在共同的问题——激发能量问题：激发能量小则地震波能量弱，不能取得有效信号，达不到勘探目的；激发能量达到能够满足取得有效信号的程度时，其能量就会对周围受保护的建筑物构成一定程度的损害。这将使激发能量与取得有效信号之间产生了难以调和的矛盾，为了达到勘探的目的，本书将探讨如何使激发能量向上的部分减小，使之不能构成对受保护建筑物的损坏，又要使之满足取得有效信号的能量。为此，我们采用较为成熟的爆炸理论及爆炸方法、数值模拟技术，对炸药爆炸形成地震波能量进行了研究；由于介质中的爆炸效应及其在地震勘探中的应用涉及爆炸力学、岩土介质动力学、固体力学和地震波理论等多学科领域，是一个跨学科的研究问题。装药结构、装药参数、炸药性质以及炸药的埋置深度、线形、介质的动力学参数等，都会对爆炸效应和波场产生影响。在此情况下，我们将利用现有的相关理论和已掌握的有关技术对如何解决这一能量匹配矛盾进行研究，研制出能够解决这一问题的产品，并提出一套使用方法。

本书在编写过程中得到了南京理工大学王晓鸣教授、李文彬教授、山东机器厂徐德惠同志、房师欣同志、中国石化胜利石油管理局地球物理勘探开发公司吕公河、于静、何京国等同志的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

1　爆炸形成地震波的理论研究 …… (1)
1.1　震源的爆炸机制 …… (1)
1.2　岩土介质的物理力学性质及其影响爆炸作用的指标 …… (5)
1.3　岩土介质中爆炸冲击波参数理论计算 …… (6)
1.4　岩土介质中爆炸冲击波的能量分配 …… (8)
1.5　爆炸激发地震波频率分析 …… (12)
1.6　影响炸药激发效果的因素分析 …… (15)
1.7　聚心爆轰的特点与原理 …… (18)
1.8　延迟叠加震源的研究 …… (19)
2　震源爆炸对地表建筑物破坏的能量分析 …… (38)
2.1　一次性齐爆条件下对地表建筑物破坏的能量分析 …… (38)
2.2　垂向延期多点起爆条件下对地表建筑物破坏的能量分析 …… (38)
2.3　城区炸药震源对地表建筑物破坏的能量分析 …… (39)
3　数值模拟分析 …… (45)
3.1　延迟叠加震源数值模拟分析 …… (45)
3.2　超速聚能震源数值模拟分析 …… (48)
3.3　不同长径比地震效果模拟 …… (56)
3.4　减震体数值模拟 …… (62)
3.5　数值模拟结论 …… (67)
4　新型震源结构设计与性能测试 …… (68)
4.1　垂直延迟震源结构设计 …… (68)
4.2　超速聚能震源结构设计 …… (69)
4.3　超速聚能延迟叠加震源结构设计 …… (70)
4.4　超速聚能地表减震震源结构设计 …… (72)
4.5　震源产品性能指标测试 …… (73)
5　试验结果及其资料分析 …… (84)
5.1　延迟叠加震源与常规震源的对比分析 …… (84)
5.2　共心聚能震源与常规震源对比 …… (90)
5.3　延迟叠加震源在胜利其他地区的大规模应用效果 …… (91)

5.4 研究结论与建议 …… (112)
参考文献 …… (113)

1 爆炸形成地震波的理论研究

地震勘探是利用人工震源激发，产生地震波，在地下空间传播，遇到波阻抗分界面时，一部分能量被反射回来，形成反射波。地震勘探就是通过分析和研究这些反射信息来确定地下介质的空间分布的。可见，震源是影响地震记录品质的主要因素之一，激发震源效果的好坏，直接决定着勘探的质量。因此，激发源所产生的子波应满足以下条件：

（1）较宽的频带宽度，即地震波应包含足够多的高频和低频成分；

（2）较高的主频，能够满足地震勘探分辨率的需要；

（3）保证足够多的地震波能量，特别是深层反射能被仪器接收；

（4）较高的信噪比，特别是改善高频成分的信噪比，并且为处理阶段进一步改善信噪比提供条件。

炸药震源是目前地震勘探中最常用且较为理想的主要震源，它激发的地震波具有良好的脉冲性质和较高的地震波能量。在陆上地震勘探中，多数情况下炸药是在充满水的浅井中爆炸，以激发地震波。在无法钻井或钻井困难的地区多采用坑中爆炸。在江河湖海勘探时采用水中爆炸。

炸药震源在常规的地震勘探中应用相当广泛，但随着勘探程度的不断深入，勘探要求也越来越高，对具有特殊要求和特殊地表的地震勘探，普通的成型炸药由于产生的振动大，对地表的破坏作用明显，且普通震源激发后信噪比低，次生干扰严重等，已经不适合当前地震勘探的要求，所以人们开始研究新型的激发震源，以求得到比较好的勘探效果。根据地震波传播、吸收衰减规律，高频、低频信号衰减差异较大，高频信号因地层滤波作用和地层的吸收作用，反射能量大幅度衰减，通过深层反射到地面来的信号大多是微弱的低频信号，甚至这些有效反射信号常常被“淹没”在干扰中。大地衰减作用是非人为因素所能改变的，只有通过对激发震源这一重要环节进行研究，使其激发后具有比常规震源更宽的频带，在有效频带范围内振幅向高频方向增强，提高激发地震波的下传能量，性能要稳定，并保证分辨率和信噪比。

1.1 震源的爆炸机制

在地震勘探中炸药爆炸的瞬间压强高达几万个兆帕，炸药包附近的岩石在强压力的作用下发生永久形变（岩石被破碎、粉化），形成一个实际的空穴区（随着炸药量的不同，这个空穴的范围一般为 1m 至几米）。在此空穴之外，压力迅速衰减，空穴区以外的一定范围内，岩石虽然不像空穴区那样被破碎、粉化，但由于压力仍然超过岩石的弹性限度而使岩石的形变不能全部恢复，产生了所谓塑性形变区。过了这个区域，压力衰

减到没有超过岩石的弹性限度，虎克定律便得到满足，岩石的形变就能全部恢复，即进入弹性形变区，如图 1－1 所示。

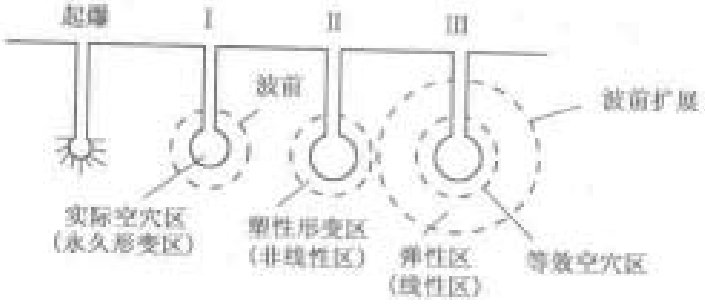

图 1－1　爆炸的物理过程

实际空穴区（永久形变区）和塑性形变区都不满足虎克定律的条件，都属于非弹性区。因此，把塑性区以内的范围称为等效空穴区。等效空穴区的边缘（也就是弹性区的起始界限）所产生的岩石质点扰动才是地震波的起始扰动，称之为地震激发波。这种扰动是一种弹性波，服从固体介质中弹性波的传播规律，在均匀介质中，它的波前面是一个球面。

从理想介质中球状震源的假设条件出发，推导出纵波位移方程，结合爆炸的有关原理，可定量地分析激发子波振幅、频率与药量大小的关系。

1.1.1　球腔震源的纵波位移方程

假设在均匀各向同性的无限大的弹性介质中，挖一个半径为 r 的球形空腔来模拟实际炸药的爆炸，当药包体积很小而 r 又足够大时，可认为在球腔壁上只产生弹性形变，爆炸引起介质质点的振动，可以通过表达式加以说明纵波的位移方程：

$$\mu = \frac{r^2 p_0}{2\sqrt{2}\mu S} e^{-k_1\sqrt{\tau}} \sin k\tau \tag{1-1}$$

$$k = \frac{2\sqrt{2}}{3}\frac{v}{r} \tag{1-2}$$

式中　p_0——作用于腔壁上的起始应力；

μ——切变模量；

τ——波的传播时间；

k——圆频率；

v——介质波速；

S——传播距离。

从上式可知位移是按指数规律衰减的正弦振动，位移随传播距离的增大反而减小，随 r 的增大而增强，r 又随药量的增大而增加，即位移与药量成正比关系。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.1.2 激发子波的振幅、频率与药量的关系

从爆炸原理中推导出在爆破理论中认为球形药包药量的大小与被爆破的岩石体积成正比，即为：

$$Q=qV \tag{1-3}$$

式中 Q——药量；

q——单位体积岩石的炸药消耗量；

V——体积。

爆炸漏斗的底圆半径 r 对标准抛掷爆炸来说，其漏斗体积为：

$$V=\frac{\pi r^2\omega}{3}\approx r^3 \tag{1-4}$$

故可得：

$$Q=qr^3$$

或

$$r=(Q/q)^{1/3} \tag{1-5}$$

可得球腔半径与药量的立方根成正比，激发子波的强度与药量的立方根成正比。因此，在地震勘探中激发子波的振幅 A 与 Q 的立方根成正比关系即 $A=cQ^{1/3}$，设 $c=1$ 时作出的 A 与 Q 的关系曲线如图 1-2 所示。从图上可以明显地看出随着 Q 的增大，曲线形态越来越平缓，增大到一定值时，A 增加得很小，主要是由于此时的药量大部分用于岩石的破坏作用，只有小部分转化为弹性能量。

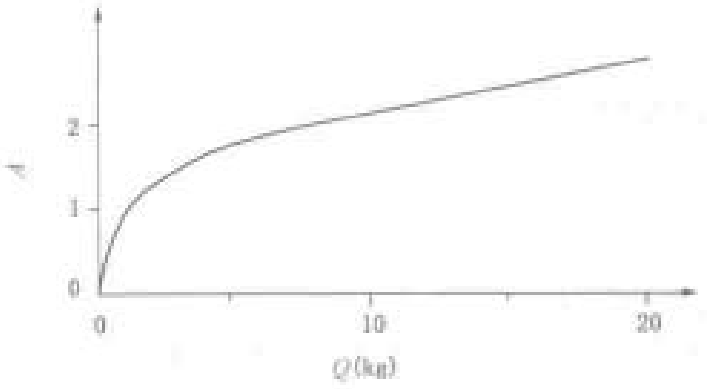

图 1-2 A 与 $Q^{1/3}$ 的关系曲线

而激发子波的频率与药量的立方根成反比，即 $f=cQ^{-1/3}$，作出 f 与 Q 的关系曲线如图 1-3 所示。从图上可以明显地看出随着药量 Q 的增大频率 f 变低，曲线形态越来越平缓，药量减小到一定值时，f 随药量的变化曲线趋于稳定。

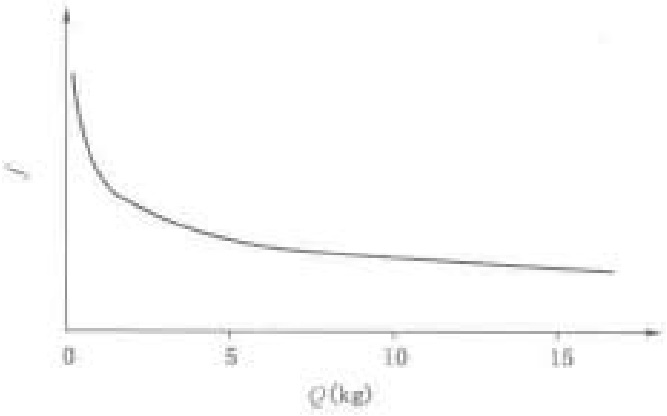

图 1-3　f 与 Q 的关系曲线

在地震勘探中记录的是质点运动速度 $s(t)$，它是位移（u）对时间（t）的导数，即：

$$s(t)=\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{1-6}$$

对 $s(t)$ 做傅里叶变换，可以得到频率域表达式：

$$S(\omega)=\frac{1}{k}\frac{i\omega}{\left(\frac{k}{\sqrt{2}}+i\omega\right)^2+k^2} \tag{1-7}$$

于是振幅谱为：

$$|S(\omega)|=\frac{\omega}{k\sqrt{\left(\frac{3k^2}{2}-\omega^2\right)^2+2k^2\omega^2}} \tag{1-8}$$

由此可以得到振幅谱的极大点频率为：

$$\omega=\sqrt{\frac{3}{2}}k=\frac{2v}{\sqrt{3}r} \tag{1-9}$$

即振幅谱的极大点频率与孔穴半径成反比。

把 ω 代入振幅谱公式（1-8）的振幅谱极大点的幅度为：

$$|S|=\frac{1}{\sqrt{2}k^2}=\frac{9r^2}{8\sqrt{2}v^2} \tag{1-10}$$

振幅谱的均方根值为：

$$S_{\mathrm{rms}}=\left[\int_{-\infty}^{\infty}|S(\omega)|^2\mathrm{d}\omega\right]^{\frac{1}{2}}=\left(\frac{27k}{64v^2}\right)^{\frac{1}{2}}r^{\frac{1}{2}} \tag{1-11}$$

即振幅谱均方根与孔穴半径的3/2次方成反比。

爆炸产生的震源子波的振幅与孔穴半径近似成正比，而震源子波的视频率则与孔穴半径近似成反比。在离开药包的距离超过孔穴半径几倍时，震源子波与孔穴半径的关系是比例缩放关系，孔穴半径增加1倍，则震源子波的振幅也增大1倍，沿时间方向也拉长1倍。

上述关系是在理想情况下推导的，即假设介质是均匀的和完全弹性的，孔穴是球形，另外对作用于孔穴内壁的压强函数假设是阶跃函数，这些条件都只能近似满足。

1.2 岩土介质的物理力学性质及其影响爆炸作用的指标

岩土介质中的爆炸特性主要是由岩土介质的物理力学性质与爆炸源的类型所决定的。在坚硬的岩石与松软的土体中，相同爆炸源爆炸时，爆炸地震波的幅值和频谱特性等都有显著差异。

岩石和土体都是多组分介质，它们包含着固体、液体和气体三相成分。

岩石大多是由单一或多种矿物组成的固体介质，其中每一种矿物和空隙中的液体、气体都被看作是独立的组分。岩石的动力特性与岩石的矿物成分、三相组分的含量以及胶结程度和构造等密切相关。

土是矿物颗粒的集合体，大多是未固结的松散堆积体。矿物颗粒组成土的骨架，其间的空隙若同时充填有水和气体时，则称为三相土。土粒、水和气体分别称作土的固相、液相和气相。如果土粒间的空隙全部被水或空气充填则表现为两相性，即饱和土的固、液相和无水干燥的固、气相。对于单位体积的土，如果以α_1，α_2，α_3表示，固体颗粒、水、气的相对体积则可表示为：

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \tag{1-12}$$

令$\bar{\rho}_1$，$\bar{\rho}_2$，$\bar{\rho}_3$和ρ_1，ρ_2，ρ_3分别表示单位土体中固、液、气相应各相的质量和质量密度，则单位土体的总质量（土体密度）为：

$$\rho = \bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2 + \bar{\rho}_3 = \alpha_1\rho_1 + \alpha_2\rho_2 + \alpha_3\rho_3 \tag{1-13}$$

岩土介质中各相的相对含量和相互作用决定着介质的状态，从而介质对爆炸波的响应有着明显的影响。由固体颗粒、水和少量封闭空气组成的三相混合介质——准饱和土，它的气相含量的变化对爆炸波的参数，如压力、波传播速度及质点运动速度有很大的影响。当气相含量接近于零时，在激励源较远的地方，传播的应力波仍是冲击波，但随着气相含量的增加，冲击波会在一定的距离外突然消失。因此，准饱和土中气相具有黏性，而液相黏性可以忽略。在爆炸荷载作用下，三相介质间无相对运动，在压力较大时，三相准饱和土可以看作非线性黏弹性介质，其中爆炸波的传播及其与结构的相互作用同非饱和土及二相混合介质有明显的差异，从而分析研究的方法也不相同。

岩土的孔隙度（或孔隙比）、密度和饱和度（或含水量）是岩土介质的重要物理指

标，它们对爆炸作用的影响很大。一切岩土都是孔隙介质。这种孔隙性用孔隙度和孔隙比两个指标来表示。岩土的孔隙度 ϕ 为孔隙体积与岩土总体积的比值，而孔隙比 e 是岩土中孔隙体积与固相组分体积之比。孔隙度 ϕ 与孔隙比 e 有以下关系：

$$\phi = \frac{e}{e+1} \tag{1-14}$$

$$e = \frac{\phi}{1-\phi} \tag{1-15}$$

孔隙度与孔隙比都反映着土的孔隙性，但在爆炸荷载和其他作用力的土力学分析中更多采用孔隙比指标。

岩土的密度为包含天然含水率和天然结构的岩土单位体积的质量。密度值的大小取决于矿物成分、含水率和结构（孔隙度）的特性。当重矿物含量、含水量提高时密度值增大，而孔隙度变大时，密度值降低。

岩土的力学性质差异很大，大部分岩石具有较高的抗压强度和弹性模量，除爆炸近源区及高温高压条件下表现为破碎和塑性变形外，基本上以弹性变形为主，应力—应变关系遵循虎克定律。而大部分土介质在不大的外力荷载下，都发生不同程度的压缩变形，故常作为流体介质处理。土的压缩性是土介质在荷载作用下产生变形的特性。黏性土有两种变化机理：第一类是骨架变形。在弱荷载时，表现为颗粒接触面上的结合物的弹性变形；强荷载时，结合物结构关系被破坏颗粒发生相互位移，表现为不可逆的塑性变形。第二类是相变形。这种变形取决于介质的各相压缩量。两种机理在土的压缩变形过程中由于介质相组分不同而处于不同的地位。但不论哪一种类型，都将对土的孔隙比产生影响。

事实上，孔隙中的相组分是含气，还是含水以及它们所占的比例（如水饱和或准饱和），骨架结构及联结类型，矿物颗粒的成分、形状、大小，介质的密实程度，渗透性等，对土的压缩变形特性都有不同程度的影响。

应当指出的是岩土的一些物理性质指标在静载和动载条件下是有明显变化的，这可从它的静、动载弹性模量值的变化反映出来。

1.3 岩土介质中爆炸冲击波参数理论计算

爆炸产生的巨大能量以波的形式作用于周围介质，在不同的区域内分别以三种不同性质的波由爆炸中心向外传播。对于其中离爆炸中心最近的冲击波来说，在其波阵面上，超压、密度、声速、质点速度、温度都存在不连续性，这种不连续性导致了熵和温度不可逆的热力学过程。冲击波波前状态和相关参数可由力学和热力学条件给出。

根据质量守恒定律，流入波阵面上的单元体积的质量必须等于从这个体积流出的质量，可得方程：

$$\rho_0(c-u_0) = \rho(c-u) \tag{1-16}$$

依据动量守恒定律，单元体积的动量改变等于所作用的压力冲量，则：

$$\rho_0(c-\dot{u}_0)(\dot{u}-\dot{u}_0)=p-p_0 \tag{1-17}$$

由热力学条件确定的能量守恒定律，压缩介质个别体积所消耗的功等于介质中能的增量，据此有：

$$p\dot{u}-p_0u_0=\rho_0(c-\dot{u}_0)\left[E-E_0+\frac{1}{2}(\dot{u}^2+\dot{u}_0^2)\right] \tag{1-18}$$

当冲击波前介质为静止状态时，上述方程可简化为：

$$\rho(c-\dot{u})=\rho_0 c \tag{1-19}$$

$$p-p_0=\rho_0 c\dot{u} \tag{1-20}$$

$$E-E_0=\frac{1}{2}(p+p_0)\left(\frac{1}{\rho_0}-\frac{1}{\rho}\right) \tag{1-21}$$

式中 p、ρ、$\dot{u}$、E——冲击波波阵面上的压力、密度、质点速度和比内能。

当介质初始压力 p_0 及单位质量内能可以忽略不计时，可把波阵面超压近似为：

$$p=\rho_0 c\dot{u} \tag{1-22}$$

波阵面质点速度：

$$\dot{u}=c\left(1-\frac{1}{\rho}\right) \tag{1-23}$$

单位质量的比能：

$$E=\frac{p\dot{u}}{2\rho_0 c} \tag{1-24}$$

能量密度：

$$w_m=\rho_0 c_m\int_0^\tau \dot{u}^2(t)\,\mathrm{d}t \tag{1-25}$$

式中 c_m——爆炸空腔形成过程中的冲击波平均速度。

在爆炸初始阶段临近介质的爆炸能传导系数可表示为：

$$\eta=\frac{w_{\Pi}}{w_{\Pi 0}} \tag{1-26}$$

其中：

$$w_{\Pi}=w_mS$$
$$w_{\Pi 0}=QJ_0\times 427$$

式中 S——冲击球形表面积；

Q——炸药量，kg；

J_R——炸药爆热，J/kg。

岩土介质中由冲击波产生的应力可表示为：

$$\sigma_r = \rho_0 c_1 u_r \tag{1-27}$$

$$\sigma_\theta = \rho_0 c_1 u_\theta \tag{1-28}$$

式中 c_1——介质纵波速度；

u_r，u_θ——波阵面上的径向分量和切向分量。

正压作用时间 τ 对应的质点位移：

$$u = \int_0^\tau u(t)\mathrm{d}t \tag{1-29}$$

冲量密度：

$$I = \rho_0 c_1 \int_{K_0}^{\tau} u(t)\mathrm{d}t = \rho_0 c_1 u \tag{1-30}$$

1.4 岩土介质中爆炸冲击波的能量分配

装药在岩土中爆炸时，岩土的破裂、破碎及抛掷是爆炸应力波和爆生气体共同作用的结果，也就是说爆破能量是通过冲击波和爆生气体传递给岩土的，装药起爆后，炮孔周围岩土中激起的爆炸冲击波剧烈冲击压缩岩土而形成粉碎区，同时造成岩土质点位移，扩胀爆腔。冲击波对岩土做功，能量迅速衰减，至破碎区边缘，冲击波依次衰变为塑性及弹性应力波（以下简称应力波），应力波的传播使岩土切向拉伸产生径向裂隙，其扩展过程中继续消耗冲击波的能量，应力作用强度降低，以致在裂隙区之外只能引起岩土的弹性变形及质点振动，紧随冲击波之后，爆生气体继续膨胀，进一步扩张并冲入裂隙，产生“气模效应”，引起裂隙延伸，最终破碎的岩土碎块又在爆生气体剩余膨胀能量的作用下向外抛掷。因此，炸药爆炸产生的总的爆破能量可分为冲击波能量和爆生气体膨胀能量，前者主要消耗在岩土变形、开裂和形成粉碎区上，后者主要用于扩胀爆腔、延伸裂隙和抛掷岩土上。

1.4.1 粉碎区和裂隙区半径计算

（1）粉碎区：炮孔周围岩土中的粉碎区是爆炸冲击波强烈冲击压缩的结果，其范围是由冲击波强度和岩土强度共同决定的。假设冲击波后岩土为不可压缩流体，粉碎区半径为：

$$R_c = r_0\left(\frac{\rho_m C_p v_0}{K_0[\sigma_c]}\right) \tag{1-31}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

式中 ρ_m——岩土密度；

C_p——岩土纵波速度；

v_0——孔壁岩土质点初始移动速度；

$[\sigma_c]$——岩土静态单轴抗压强度；

K_0——冲击波作用岩土强度提高系数，可取 $K_0=10$；

r_0——炮孔半径。

（2）裂隙区：粉碎区外，冲击波衰变成应力波，在其作用下，岩土中形成径向裂隙区，其半径为：

$$R_1 = r_0\left(\frac{\lambda p_m}{[\sigma_t]}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \tag{1-32}$$

式中 $[\sigma_t]$——岩土抗拉强度；

λ——系数，$\lambda=\frac{\nu}{1-\nu}$；

ν——岩土泊松比；

α——应力波衰减指数，$\alpha=2-\frac{\nu}{1-\nu}$；

p_m——孔壁初始冲击压力。

1.4.2 冲击波扩胀爆腔规律

在冲击波强烈压缩下，孔壁岩土质点发生径向位移，炮孔直径增大，爆腔扩胀。当冲击波传播到粉碎区边缘时，冲击压缩过程结束，由冲击波引起的爆扩过程也随之终止。在此过程中岩土遵守质量守恒定律：

$$(r^2-r_0^2)\rho_m=\int_{r_1}^{r}2\rho r\mathrm{d}r \tag{1-33}$$

式中 r——冲击波作用半径；

r_1——与 r 对应的爆腔半径；

ρ——冲击波波阵面上的岩土密度。

有关研究表明：冲击波波阵面之后岩土密度很小，可按等密度处理，因此可用压缩后孔壁处的岩土密度 ρ_c 取代公式中的 ρ，积分式（1-33）得：

$$(r^2-r_0^2)\rho_m=(r^2-r_1^2)\rho_c \tag{1-34}$$

由此得冲击波作用下的爆腔扩胀规律：

$$r_1=[r^2-(r^2-r_0^2)\rho_m/\rho_c]^{1/2} \tag{1-35}$$

在粉碎区边缘即 $r=R_0$ 时，爆扩过程结束，最终的爆腔半径为：

$$R_0=[R_1^2-(R_1^2-r_0^2)\rho_m/\rho_c]^{1/2} \tag{1-36}$$

在孔壁处，冲击波后岩土状态参数满足以下公式：

$$\rho_0 D=\rho_r(D_0-v_0) \tag{1-37}$$

$$D_0=a+bv_0 \tag{1-38}$$

式中 D_0——孔壁处冲击波波速；

a，b——岩土实验常数。

ρ_r 计算公式为：

$$\rho_r=\frac{a+bv_0}{a+(b-1)v_0}\rho_0 \tag{1-39}$$

1.4.3 冲击波能量分布

前已有述，冲击波能量主要消耗在扩大爆腔、产生裂隙和引起岩土弹性变形上。以单位装药长度计算，在不耦合装药条件下，炸药总的化学潜能（E_0）为：

$$E_0=\pi R_0^2\rho_0 Q \tag{1-40}$$

式中 Q——炸药的爆热。

1.4.3.1 形成爆腔消耗能量 E_1 的计算

冲击波能量的消耗等于冲击波对岩土所做的功。在爆腔扩胀过程中冲击波所做的功为：

$$W_1=\int_{r_0}^{R_1}2\pi r p_r\,\mathrm{d}r \tag{1-41}$$

将岩土中冲击波峰值压力的衰减规律 $p_r=p_m(r_0/r)^3$ 代入式（1-41）并积分得：

$$E_1=W_1=2\pi r_0^2 p_m\left(1-\frac{r_0}{R_0}\right) \tag{1-42}$$

因此，形成爆腔消耗能量占炸药爆炸总能量的比率为：

$$\eta_1=\frac{E_1}{E_0}=\frac{2p_m}{\rho_0 Q}\left(1-\frac{r_0}{R_0}\right) \tag{1-43}$$

1.4.3.2 产生径向裂隙消耗能量 E_2 的计算

粉碎区外应力波的峰值应力分为径向和切向两个方向，它们的计算公式分别为：

$$\sigma_r=p_m\left(\frac{r_0}{r}\right)^n（径向） \tag{1-44}$$

$$\sigma_\theta = \lambda p_m \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\alpha}\text{（切向）} \tag{1-45}$$

设径向 r 处的切向应力为 σ_θ，该处对应的裂隙长度为 a。若 $\sigma_\theta > [\sigma_t]$，裂隙将扩展，以 δ_0 表示由 σ_θ 引起的径向裂隙扩展量，裂隙长度由 a 延伸到 $a+\delta_0$ 的过程中，切向应力 σ_θ 对岩土做功并逐渐消失，与此同时裂隙表面产生的切向位移为：

$$\delta_w = 2\int_0^{\delta_0} \frac{1}{2}\sigma_\theta u_0 \mathrm{d}a \tag{1-46}$$

根据岩土断裂力学原理，裂隙端部的切向应力和切向位移可分别表示为：

$$\sigma_\theta = \frac{K_2}{\sqrt{2\pi a}} \tag{1-47}$$

$$u_0 = \frac{K'_1}{E_m}\sqrt{\frac{\delta_0 - a}{2\pi}}(1+\nu)(k+1) \tag{1-48}$$

式中 k——系数，与岩土的应力应变状态有关，在炮孔柱状装药爆破破岩中，可以看成平面应变问题而解之，$k = 3 - 4\nu$；

K_2，K'_1——分别对应于裂隙长度为 a 和 $a+\delta_0$ 时，裂隙端部的应力强度因子，δ_0 为一无穷小量，可认为 $K_2 = K'_1$。

将式（1-47）、式（1-48）代入式（1-46）并积分得：

$$\delta_w = \frac{K'^2_1 \delta_0}{E_m}(1-\nu)^2 \tag{1-49}$$

因此在裂隙扩展过程中切向应力所做的功为：

$$W_2 = n\int_0^{R_1} \delta_w \mathrm{d}r = \int_{r_0}^{R_1} \frac{nK_1^2}{E_m}(1-\nu^2)\mathrm{d}r \tag{1-50}$$

再将式（1-46）、式（1-48）代入式（1-50）并积分得：

$$W_2 = \frac{\pi\lambda^2(1-\nu^2)p_m^2 r_0^2}{E_m(1-\alpha)}\left[\left(\frac{R_1}{r_0}\right)^{2(1-\alpha)} - 1\right] \tag{1-51}$$

式中 n——径向裂隙的条数，有资料表明，径向裂隙均匀发展是不可能的，主导裂隙将从裂隙群中突出发展，而由试验所得的主导裂隙为 4～12，计算时可取 $n=8$。

所以，产生裂隙消耗的能量占爆炸总能的比率为：

$$\eta_2 = \frac{E_2}{E_0} = \frac{\lambda^2 n(1-\nu^2)p_m^2}{\rho_0 E_m Q(1-\alpha)}\left[\left(\frac{R_1}{r_0}\right)^{2(1-\alpha)} - 1\right] \tag{1-52}$$

1.4.3.3 引起弹性变形消耗能量 E_3 的计算

裂隙区外，应力波只能引起岩土弹性变形。单位体积内岩土的弹性变形能为：

$$E_1 = \frac{1}{2}(\sigma_r\varepsilon_r + \sigma_\theta\varepsilon_\theta) = \frac{1}{2E_m}(\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2) = \frac{\sigma_r^2}{2E_m}(1+\lambda^2) \tag{1-53}$$

土壤弹性变形所消耗的能量为：

$$E_3 = \int_{r_0}^{\infty} 2\pi r E_1 \mathrm{d}r \tag{1-54}$$

将式（1-53）代入式（1-54）得：

$$E_3 = \frac{\pi(1+\lambda^2)}{E_m}\int_{r_0}^{\infty} r\sigma_r^2 \mathrm{d}r \tag{1-55}$$

由波动理论可知，应力的衰减成指数变化，即：

$$\sigma_r = p_m\left(\frac{r_0}{r}\right)^n \tag{1-56}$$

将式（1-56）代入式（1-55）并积分得：

$$E_3 = \frac{\pi(1+\lambda^2)r_0^2}{2E_m(\alpha-1)}p_m^2 \tag{1-57}$$

式中 E_3——冲击波转换成地震波的能量；

σ_r，σ_θ——径向和切向应力；

ε_r，ε_θ——径向和切向应变；

E——介质的弹性模量；

p_m——冲击波对孔壁的初始压力峰值；

α——衰减系数，对含水土壤，其值可取 1.5；

r_0——炸药的初始半径（炮孔的半径）；

r——炸药爆炸后冲击波传播的距离。

因此消耗在岩土弹性变形上的能量占炸药爆炸总能量的比率为：

$$\eta_3 = \frac{E_3}{E_0} = \frac{(1+\lambda^2)p_m^2}{2\rho_0 E_m(\alpha-1)Q} \tag{1-58}$$

已知炸药的爆热 Q，取 $n=8$，根据以上公式可以分别求得三个方面消耗能量的比率。

1.5 爆炸激发地震波频率分析

地震勘探的实际工作表明，在相同的激发条件下，药量较小时，地震波主频率较高，随着药量的增大，地震波主频向低频方向移动，同时其能量按非线性规律增大。即在常规激发条件下，地震波主频与能量之间存在着矛盾，小药量虽然能增大地震波主

频，但其能量过小，来自深层的反射信号十分微弱，影响采集质量，而能量过大又会导致地震波频率变低，降低勘探的分辨率。

（1）假设在均匀各向同性无限大的弹性介质中，用球腔震源模拟实际的炸药震源，可导出若忽略介质的塑性行为，假设有一半径为 R 的球形空腔，内装炸药，炸药爆炸后将有一正压力均匀作用于腔壁上。由弹性波动方程可推出纵波的位移方程：

$$A=\frac{R^2 p}{2\sqrt{2}\mu s v_p}e^{-(\omega s/\sqrt{2})}\sin\omega t$$

$$\omega=\frac{2\sqrt{2}}{3R}v_p \tag{1-59}$$

式中 R——球形空腔半径；

p——作用于腔壁的起始压力；

v_p——介质波速；

ω——圆频率；

μ——土壤的切变模量；

s——地震波传播距离。

（2）由爆炸模型相似律，对两个尺寸不同但化学成分相同（密度和爆轰速度相同）的两个药包在各向同性均匀介质的相同点爆炸时，它们的应力场和变形场在几何上、时间上和强度上是相似的。鉴于土壤是介质各向异性的非均匀介质，在考虑爆炸的地震效应时，对于介质的恒定状态，可近似地由该理论得出振幅与药量的一般方程：

$$A=\sqrt[3]{Q}f(R) \tag{1-60}$$

式中 $f(R)$——函数，可近似认为是线性关系，即 $A\propto\sqrt[3]{Q}$；

Q——炸药量；

A——地震波振幅。

震源激发出的地震波频率与药量的立方根成反比，即：

$$f=cQ^{-1/3} \tag{1-61}$$

式中 f——地震波频率；

c——比例系数。

频谱中的峰值频率 f_p 与药量的 2/3 成反比，即：

$$A_p=c_2Q^{-2/3} \tag{1-62}$$

式中 c_2——比例系数。

A，A_p，f 与 Q 的关系曲线如图 1-4 所示。

一般认为，随着药量的加大，各频率成分都得到一定程度的提高，只是低频成分的幅值要比高频的幅值增加得多，这表明增大药量对于获得深层的高频信号是有一定作用的，只是它的作用相对有限。

利用延迟爆炸的方法可以有效地解决这一问题。采用多个小药量炸药连续激发，不

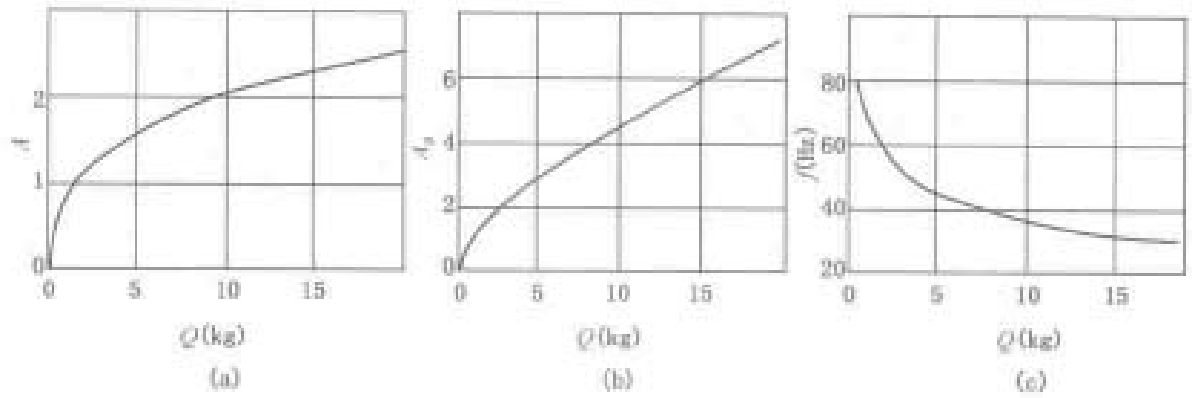

图 1－4　A，A_0，f 与 Q 的关系曲线

会因为药量的增大而使地震波的主频和频宽迅速减小。

（3）在爆破工程中，经常对炸药爆炸后地震波的频率进行测定，以确定安全距离。以下是几个试验的结果：

①不同药量对频谱的影响。

图 1－5 的测试结果表明：大药量爆炸产生的地震波高频频带较窄，小药量爆炸产生的地震波高频比较丰富。

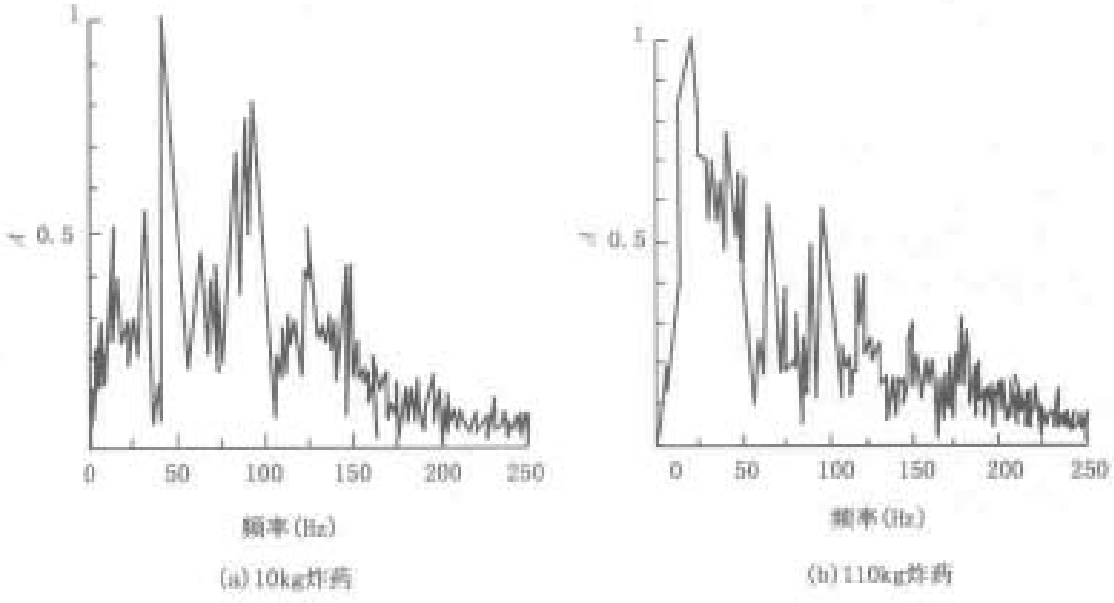

图 1－5　不同药量炸药的爆破振动频谱

②装药位置对地震波频率的影响。

测试结果（见图 1－6）表明：200g 硝铵炸药距地面 0.5m 处爆炸，地震波的高频部分有明显的优势，而地下 0.5m 处爆炸，爆炸高频部分相对就少得多了。

需要全本请访问 www.ertongbook.com