

# 1 爆破基本知识

炸药是一种特种能源，在一定条件下可以发生高速化学反应，并释放出巨大能量。据研究资料表明，在通常的爆炸条件下，其爆轰波波阵面单位面积强度可达  $10^{13} \text{W/m}^2$  数量级。因此，自炸药和相应的起爆器材发明以来，炸药已成为人类在生产建设活动中可予充分利用的能源。

生产实践中，利用炸药的爆炸能量对介质做功，以达到预定工程目标的作业称之为爆破。

## 1.1 爆破的基本概念

在交通土建工程领域，爆破、爆破破碎机理、爆破在介质中的应力状态等是爆破工程师需要了解和经常用到的几个概念，也是在具体的爆破设计和施工以及在技术上有所创新的理论依据。

### 1.1.1 爆破

工程爆破是指采用工业炸药对岩土、混凝土、建构筑物、钢铁等进行破碎、压实、疏松、拆除、切割等的作业。它是以工程建设为目的的爆破技术，作为工程施工的一种手段，以破坏的形式达到新的建设目的，直接为经济建设服务。

#### 一、工程爆破类别

工程爆破在铁道、交通、矿山、建筑、水电及国防工程等部门获得广泛应用 根据爆破的性质和用途 主要有：

#### (1) 露天工程爆破

在市政、交通工程中往往需要完成大量的土石方开挖任务，如矿山的开拓剥离，厂房基础开挖、公路、铁路路基开挖、定向爆破筑坝以及平整场地等均可采用此类工程爆破方法来完成。

#### (2) 地下工程爆破

包括各类地下矿山开采、公路铁路隧道、水工隧洞、城市地铁、地下库房、国防工程等 特点是空间狭小、作业条件艰难。

#### (3) 水下爆破

主要用于航道疏浚、港口建设、爆炸挤淤、桥梁建设中炸礁石、软弱地基夯实等工作。多采用水下钻孔爆破、水下裸露药包爆破以及聚能爆破等方法。此外，在天然湖泊和人工水库开发过程中，常采用水下岩塞爆破的方法来贯通泄水隧道。

#### (4) 拆除爆破

多用于城市、工厂改建、扩建及拆除。它的基本方法是用少量炸药布置在建筑物基础及墙体、梁、柱等结构承重部位，在爆破作用下造成结构失稳并控制其倒塌的方向和范围，以确保邻近建筑物免遭破坏。它与其他拆除方法相比较具有成本低、工期短、效率高等优点。

#### (5) 爆炸加工

爆炸加工是以炸药为能源代替传统机械加工的一种加工方法。我国从 1958 年开始研究

和应用爆炸加工技术 目前已有很大的发展 如爆炸成型、爆炸切割、爆炸冲孔、爆炸复合、爆炸焊接、爆炸铆接、爆炸硬化、爆炸雕刻等爆炸加工方法已广泛用于各种工业部门。

#### (6)特殊工程爆破

如石油钻井的压裂爆破，地震勘探中的人工激振爆破和高原冻土爆破等。

随着现代工业的迅速发展，爆破技术的进步，工程爆破的类别与用途将不断扩大和创新。

### 二、药包形状

工程爆破的目的是在破坏中求建设，是为了特定的工程目的而进行的，爆破的结果应满足该工程的设计要求，同时还必须保证其周围环境的安全。这意味着爆破工程师除了能使用一般的爆破方法进行爆破施工外，还能根据实际情况采用合理的药包形状（即炸药包的爆炸作用及特性）以达到工程目的。按药包形状可分为四类：

#### (1)集中药包

这种药包的形状理论上应是球体，起爆点在球体的中心，爆轰波以球面波向外传播，爆炸作用以均匀的分布形态作用到周围的介质上。在工程实际中通常把药包做成正方体或长方体 长方体的最长边不超过最短边的 4 倍。

#### (2)延长药包

根据施工条件将药包做成长条形，可以是圆柱状也可以是方柱状，通常把药包长度大于最短边或其换算直径 4 倍的药包叫做延长药包。但实践表明，真正起延长爆破作用的药包，其长度要大于最短边或换算直径的 20 倍。延长药包以柱面波向四周传播并作用到周围介质上。在实际应用中，深孔法、炮眼法和硃室爆破中的条形药包爆破法都属于延长药包法。

#### (3)平面药包

理想的平面药包一般理解为药包的长度和宽度比厚度要大得多。这样的药包布置在实际工程操作中往往难于达到，所以理想的平面药包实际上是以等效的硃室或炮孔装药法代替，这些药包布置在同一平面上的距离不超过某一极限值。爆破时这种平面装药法每个药包的压缩波在一定的距离内叠加成一个波，继而，这个波平行于药包布置呈平面传播，并且使介质产生与理想平面药包爆破作用下相同的规律运动。平面装药法的主要优点在于平面药包爆破时，岩石将沿着岩体临空面的法线方向运动，能显著地提高抛掷的定向性和密集性，通常用于剥离工作、爆破法筑坝（堤）开挖运河和其他水利工程。

#### (4)特定形状药包

将炸药做成特定形状的药包，用以达到特定的爆破作用。应用最广的是聚能爆破法，把药包外壳的一端加工成圆锥形或抛物面形的凹穴，使爆轰波按圆锥或抛物线形凹穴的表面聚集在它的焦点或轴线上，形成高能高速射流，击穿与它接触的介质的某一特定部位。这种药包在军事上用作破甲弹以穿透坦克的外壳或其它军事目标，在工程上用来切割金属板材、大块的二次破碎以及在冻土中穿孔等。

### 三、装药方法

按装药方法与装药空间形状的不同又可分为四种爆破方法。

#### (1)药室法

药室法爆破根据在岩体内开挖药室体积的大小，分为方形药室法、分集药室法和条形药室法三种。这是大量土石方挖掘工程中常用的爆破方法。由于这种方法所需要的施工机具比较简单 不受地形和气候条件的限制 工程量越大其功效也越高。

#### (2)药壶法

该法是在普通炮孔的底部，根据设计要求分次装入少量炸药进行不堵塞的爆破，使孔底逐步扩大成圆壶形，以求达到装入较多药量的爆破方法。该法属于集中药包类，适用于中等硬度的岩石爆破。能在工程量不大、钻孔机具不足的施工条件下，以较少的炮孔爆破，获得较多的土石方量。随着现代土石方爆破机械化水平的提高，药壶爆破的运用面有所缩小，但仍在某些特殊工程中采用。

### (3) 炮孔法

通常根据钻孔孔径和深度的不同，把深度大于 5m、孔径大于 50mm 的炮孔爆破叫做深孔爆破，反之称为浅孔爆破或炮眼法爆破。从装药结构看，这属于延长药包一类，是目前工程爆破中应用最广、数量最大的一种爆破方法。其中深孔爆破，如果采用先进的钻孔机械和装药车，可全面提高土石方施工的机械化水平。

### (4) 裸露药包法

该法不需钻孔，直接将炸药敷设在被爆物体表面并加简单覆盖。这种方法对于清除危险物、交通障碍以及破碎大块石的二次爆破是简便而有效的。由于该法炸药爆炸能量利用率低，噪声较大且易产生飞石等缺点，使用的机会较少。

## 四、评价工程爆破的技术经济指标

评价工程爆破作业的技术经济效果，常用以下指标。

### (1) 炸药单耗

指爆破  $1\text{m}^3$  或 1t 岩矿所消耗的炸药用量，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$  或  $\text{kg}/\text{t}$ 。

### (2) 延米爆破量

指 1m 炮孔所能崩落的岩石（或矿石）的平均体积或质量，单位为  $\text{m}^3/\text{m}$  或  $\text{t}/\text{m}$ 。

### (3) 炮孔利用率

一般用于地下井巷和隧道掘进爆破，指一次爆破循环的进尺与炮孔平均深度之比，单位为 %。

### (4) 大块率

指一次爆破后所产生的不合格大块在总爆破岩石量中所占的比率，单位为 %。

### (5) 爆破成本

是指爆破  $1\text{m}^3$  岩石所消耗的与爆破作业有关的材料、人工、设备及管理等方面的费用，单位为元/ $\text{m}^3$ 。

随着系统工程学科及计算机在爆破工程中的应用，国内外均在研究爆破优化问题，以实现包括钻孔、爆破、装载、运输及破碎在内的最低综合成本。

除了上述指标外，还广泛采用岩石松动、抛掷堆积效果、保留边坡、围岩的稳定性、爆破对周围环境的安全影响等来评价爆破的技术效果。

## 1.1.2 爆破破碎机理

由于炸药爆炸过程是一个高温、高压、高速的瞬时过程，被爆岩石的性质和爆破条件复杂多变，且岩石的爆破破坏过程又是一个历时极为短暂的过程，因此给直接观测和研究岩石的破坏机理造成了极大的困难。目前人们对岩石的爆破作用过程仍然了解得不够透彻，尚不能形成一套完整而系统的爆破理论作为理论分析和定量计算的依据。

尽管如此，随着长期实践经验的积累和近几十年来现代科学技术的迅猛发展，借助先进的测试技术和方法以及模拟爆破实验，对岩石中爆破作用原理的研究也取得了一定的进展，提出

了各种假说。这些假说或多或少地反映了岩石爆破破坏的规律，对生产实践具有一定的指导意义和应用价值。炸药在岩石中爆炸时，它释放出来的能量是以冲击波和爆炸气体膨胀压力的方式作用在岩石上，造成岩石的破坏。但是研究工作者在研究和解释岩石的破坏原因时，由于他们的认识和测试目的的不同而形成了三种假说。

#### 一、应力波反射拉伸破坏论

这派观点从爆轰的动力学观点出发，认为药包爆破时，强大的冲击波冲击和压缩周围的岩石，在岩石中激发成强烈的应力波。当应力波传到自由面时，从自由面反射而形成拉伸应力波，当这种波的强度超过岩石的极限抗拉强度时，从自由面开始向爆源方向产生拉伸片裂破坏作用。但这种观点完全否认了爆轰气体膨胀的破岩作用。

#### 二、爆轰气体膨胀压力作用破坏论

这派观点是从静力学的观点出发，认为药包爆炸后，产生大量高温高压的气体，这种气体膨胀时所产生的压力作用在药包周围的岩壁上，引起岩石质点的径向位移，由于作用力的不等引起的不同的径向位移，导致在岩石中形成剪切应力，当这种剪切应力超过岩石的极限抗剪强度时就会引起岩石的破裂。当爆轰气体的膨胀推力足够大时，还会引起自由面附近的岩石隆起、鼓开并沿径向方向推出。与上述理论相反，这种观点又完全否认了冲击波的作用。

#### 三、冲击波和爆轰气体膨胀压力共同作用破坏论

这派观点认为爆破时岩石的破坏是冲击波和爆轰气体膨胀压力共同作用的结果。但在解释岩石的破碎原因是谁起主导作用时仍存在不同的观点。一种观点认为冲击波在破碎岩石时不起主要作用，它只是在形成初始径向裂隙时起了先锋作用，但是在大量破碎岩石时则主要依靠爆轰气体膨胀压力的推力作用和尖劈作用。另一种观点则认为爆破时岩石破碎谁起主要作用要取决于岩石的性质，即取决于岩石的波阻抗。对于高波阻抗的岩石，即波阻抗为  $(10 \sim 15) \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，极致密坚韧的整体性岩石，其爆炸应力波的传播性能好，爆破时岩石的破坏主要是应力波作用的结果；对于低波阻抗，即波阻抗为  $(2 \sim 5) \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$  的松软而具有塑性的岩石，爆炸应力波传播的性能较差，波速较低，爆破时岩石的破坏主要依靠爆轰气体的膨胀压力；对于中等波阻抗，即波阻抗为  $(5 \sim 10) \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$  的中等硬度岩石，爆破时岩石破坏的应力波和爆轰气膨胀压力起同样重要作用。

近几十年来的研究、实验和生产实践表明，第三种的理论假说，比较符合工程实际情况。

### 1.1.3 爆破时介质中的应力状态

#### 一、集中药包

炸药爆炸所释放出来的能量以冲击波和爆轰气体膨胀压力的方式作用在药包周围岩石上，岩石在这两种荷载作用下，内部将产生复杂的应力状态。

##### (一) 应力波在岩体传播时引起的应力状态

当药包爆炸产生爆轰波传到药包与岩石的接触面时，一部分爆轰波会反射回来，一部分爆轰波则会透射入岩体中，在岩体内激发出一种波峰压力很高的脉冲应力波，即冲击波。为确定冲击波在岩石中引起的应力状态，首先必须了解冲击波在岩体中的传播规律。

##### (1) 岩体中冲击波的传播规律

由药包爆炸在岩体内激起的冲击波是以一定的传播规律在岩体中往前传播的。冲击波的初始峰值压力就是爆轰波给予岩石的最初压力。其值的大小取决于炸药的性质、岩石的性质和炸药与岩石的耦合情况。冲击波的初始波峰压力可按下列公式计算：

$$P_r = \frac{2\rho_r C_{L,r}}{\rho_e \cdot D + \rho_r \cdot C_{L,r}} \cdot P_e \quad (1-1)$$

式中： $P_r$ ——岩石中冲击波的初始波峰压力，kPa；

$\rho_r$ ——岩石的密度  $\text{kg/m}^3$ ；

$C_{L,r}$ ——岩石中纵波传播速度，m/s；

$\rho_e$ ——炸药的密度  $\text{kg/m}^3$ ；

$D$ ——炸药的爆速，m/s；

$P_e$ ——炸药的爆轰压力，kPa。

从式(1-1)可以看出，同一种炸药在不同性质的岩石中爆轰激发出的冲击波的初始峰值压力并不相同。波阻抗大的岩石，在炮孔壁上产生的压力也越大。

冲击波在岩体内传播过程中，其强度随着距爆源距离的增大而减小。波的性质和形状也产生相应的变化。根据波的性质、形状和作用性质的不同，可将冲击波的传播过程大致分为三个作用区。在离爆源约3~7倍药包半径的近区，冲击波的强度极大，波峰压力一般都大大超过岩石的动抗压强度，使岩石产生塑性变形或粉碎。与此同时，冲击波消耗了大部分的能量，发生了急剧的衰减。这个距离的范围叫做冲击波作用区。冲击波通过该区后，由于能量大量消耗，冲击波衰减成压缩应力波，波阵面上的状态参数变化得比较平缓，波速接近岩石中的声速。由于压缩应力波的作用，岩石处于非弹性状态，可导致岩石的破坏或残余变形。该区即为压缩应力波作用区，其范围可达到120~150倍药包半径的距离。压缩应力波传过该区后，波的强度进一步衰减，变为弹性波或地震波，波的传播速度等于岩石中的声速，它的作用只能引起岩石质点的弹性振动，而不能使岩石产生破坏。此区称为弹性振动区。

冲击波在岩体中的传播规律受诸多因素的影响，如炸药的性质、药包的形状、岩石的性质、传播距离等。一般的规律是：在冲击作用区应力衰减大致与传播距离的平方成正比；在地震波作用区，应力的衰减大致与传播距离成线形关系。此外，球形药包产生的冲击波其衰减速度比柱形药包快；冲击波在松软或多裂隙的岩石中传播比在均质、致密的整体性岩石中衰减要快。

冲击波在岩石中传播时，其波阵面上的压力衰减规律可以用下面的经验公式来表示：

$$P = P_r \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \quad (1-2)$$

式中： $P$ ——离药包的距离为  $r$  处的冲击波波峰压力，kPa；

$P_r$ ——冲击波初始的波峰压力，kPa；

$r$ ——距药包的距离，m；

$r_0$ ——药包的半径，m；

$n$ ——指数， $n = 2 \pm \mu / (1 + \mu)$ ，冲击波作用区取“+”，压缩应力波作用区取“-”， $\mu$  为岩石的泊松比。

## (2) 应力波在岩体中引起的应力状态

爆炸应力波在岩体中引起的应力状态，不但随时间而变化，而且随距药包的距离而变化。在爆炸应力波作用的大部分范围内，爆炸应力波是以压缩应力波的方式传播的，其引起的岩石应力状态可以近似地采用弹性理论来研究和解析。近代动力学的分析方法，是按应力波的传播、衰减、反射和透射等一系列规律，计算应力场中各点在不同时刻的应力分布情况，以获得任意时刻的应力场及任意小单元的应力状态随时间变化的规律。由于计算比较复杂，下面仅就一个自由面条件下爆破的应力解析方法和结果作简要介绍。

爆炸应力波由爆源向自由面倾斜入射时，在自由面附近岩石中某点的应力状态是复杂的。它由直达纵波、直达横波、纵波反射生成的反射纵波和反射横波、横波反射生成的反射纵波和反射横波等的动态应力叠加而成。但由爆源向四周岩体中发射的应力波主要是纵波，因此，下面就入射波是纵波的情况加以介绍。

如图 1-1 所示，设自由面方向为横轴，最小抵抗线方向为竖轴， $O$  点为药包中心（即爆源），岩石中任一点  $A$  的应力状态可作如下分析：该点由入射直达纵波产生的应力为  $\sigma_{ip}$  由反射纵波产生的应力为  $\sigma_{rp}$  由反射横波产生的应力为  $\sigma_{rs}$  则  $A$  点的应力为三者的合成，由合成应力引起的三个主应力为  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 。

当拉伸主应力  $\sigma_2$  出现极大值时，自由面附近岩体中各点的主应力和的方向如图 1-2 所示。这种应力分布方向对于解释爆破时岩体中发生的裂隙方向具有重要的意义。

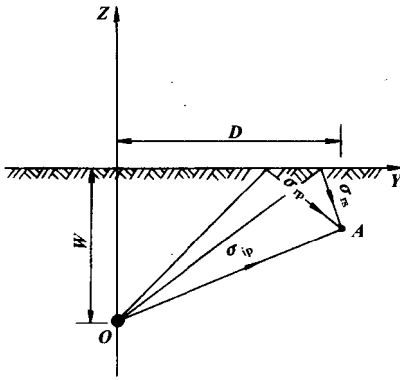


图 1-1 波到达  $A$  点的应力分析

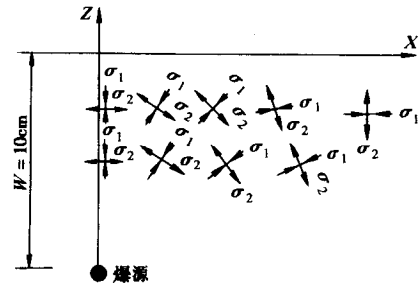


图 1-2 当  $\sigma_2$  达到极大值时  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的方向  
(试验条件 砂石, 一个自由面, 1号雷管爆炸, 最小抵抗线  $W = 10\text{cm}$ )

如果爆源附近有自由面，自由面对应力极大值的变化产生很大的影响。一般说来在自由面附近所产生的压缩主应力比无自由面时要小；拉伸主应力则比无自由面时要大，且爆源离自由面越近，拉伸主应力的增长越显著。这意味着自由面附近的岩石处于比较容易被破坏的拉伸应力状态下，说明自由面对爆破效果的提高起着重要的作用。

## (二) 爆轰气体压力作用下岩体的应力状态

药包爆破时，在药室体积没有发生变化以前，爆轰气体压力可以视为是恒定的。因此，由它引起的应力状态是均匀的 且与时间无关 只取决于该点的位置 表现为静的应力状态。

当岩体中的集中药包爆轰时，由于药室周壁岩石被冲击波压缩和粉碎，药室体积增大，爆轰气体以准静态的方式作用在岩壁上，在岩体中各点的主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的作用方向如图 1-3 所示，该应力分布状态与图 1-2 中的应力分布状态极为相似，但爆轰气体压力所引起的主应力  $\sigma_1$  常为压缩应力，而主应力  $\sigma_2$  常为拉伸应力，随着距离最小抵抗线超过某一极限距离以后 主应力  $\sigma_2$  变为压缩应力。根据图 1-3 中所示的主应力作用方向，可以推断和解释在爆轰气体静压的作用下，岩体中产生破坏的裂隙方

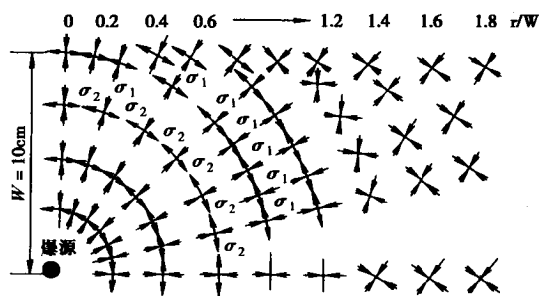


图1-3 主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的作用方向

向。

## 二、延长药包爆破时岩体中的应力状态

延长药包是相对于集中药包而言的。当药包的长度和它的横截面的直径或边长之比  $\phi$  值大于某一值时,叫做延长药包。 $\phi$  值大小的规定目前尚未统一,有些人主张  $\phi \geq 6 \sim 8$  时属延长药包,而另一些人则主张  $\phi \geq 15 \sim 20$  时属延长药包。从延长药包工程爆破的实际效果分析, $\phi = 20$  时比较理想。

延长药包与集中药包相比,在爆后岩石中应力波参数、应力波传播时的衰减规律以及应力的分布等方面有着明显的差异。

### (1) 应力分布不均匀

集中药包从中心起爆时,向四周释放出的能量一般是比较均匀的,因而在岩石中激发出的应力也是均匀分布的。延长药包由于它的几何形状的特点,若从一端起爆则在岩体中激发出的应力分布复杂而不均匀,在某些部位应力集中比较高。下面用图来说明延长药包爆破时的应力分布情况。

为了研究延长药包爆破作用的特点,将延长药包沿轴向分成若干个集中药包,各个集中药包先后爆破时都产生一个球面应力波,再用波的向量合成原则,求出岩石中各点各个时刻的应力状态。

在图 1-4 中有一个垂直于自由面的延长药包,根据药包横截面的直径将它分成五个短药柱,即长度为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  的五个短药柱。每一个短药柱以恒定的时间间隔  $t_n (t_n = d/D, d$  为药包直径,  $D$  为炸药爆速) 进行爆轰,全部短药柱爆轰时间的总和等于整个药柱爆轰的时间。假定雷管从孔底起爆,且认为每一个短药柱爆轰产生的应力波波长和  $t_n$  都相等,并假设炸药的爆速  $D$  和在岩体中的应力波的传播速度  $C_{Ir}$  之比为 2:1。

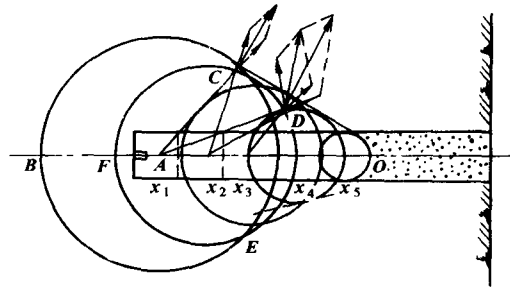


图 1-4 延长药包爆破时的应力分布

当延长药包完全爆轰后,药包周围岩体中的应力分布如图 1-4。从图中可以看出,在  $AB$  方向上的各点,由于应力波波速是恒定的,且药包的爆轰是向相反方向进行的,所以不存在各短药柱引起的应力波的叠加作用。在  $AC$  方向上的各点,由  $x_1, x_2$  引起的应力波在  $C$  点叠加,因此该处的应力高于线上其他点的应力;在  $AD$  线上的  $D$  点应力是由  $x_2, x_3, x_4$  产生的应力波引起的应力的叠加,因此  $D$  点的应力又高于  $C$  点的应力。同理可知,在被  $C, O, E$  和  $CE$  弧所圈定的区域内,由于药包各部分产生应力波的叠加,而形成了高应力区。相反地,由  $C, B, E$  和  $CFE$  弧圈定的区域为低应力区。

根据计算表明, $D$  点周围的应力可达  $AB$  方向上的应力的 20 倍左右; $C$  点的应力约为  $AB$  方向上的 15 倍左右。因此,一端起爆的延长药包爆轰在岩体中引起的应力的分布是不均匀的,一般说来,应力高的区域易造成岩石的破碎,而且破碎的效果要更好一些。

### (2) 应力波的参数大

前苏联 A·H·哈努卡耶夫用六号阿莫尼特炸药的集中药包和延长药包对同种花岗岩进行爆破试验,在折算距离相同时,测得的应力波的所有参数,延长药包的都比集中药包大。

### (3) 应力波衰减慢

延长药包在岩体中爆破时所引起的应力波,在传播过程中,它的波参数随距离的增加的衰

减要比集中药包的慢，这是由于球面波的波阵面与传播距离的平方成正比增大，而延长药包的柱面波的波阵面只与传播距离的一次方成正比增大。

### 三、平面药包

理想的平面药包实际上可以由等效作用的成组平行排列的延长深孔、浅眼、掏槽药包，或者由布置在一个平面上距离不超过一定限度的成组平行的集中药室、药壶药包所代替。这种成组药包若同时起爆或采用微差起爆时，则相邻药包之间相互作用，由两个药包爆破产生的应力波相互叠加，使岩石中的应力状态要比单个药包爆破时复杂得多。前苏联 A·H·哈努卡耶夫为了说明单个药包和这种成组药包爆破作用的差异，曾在石灰岩和煤中进行过对比爆破试验。试验结果绘制在图 1-5 和图 1-6 上。从图中可以看出，在爆破中心  $(70 \sim 80)R_0$  ( $R_0$  为药包半径) 的地方，成组药包爆破时质点移动速度是单个药包爆破时质点移动速度的 2.0 倍。而折合成能流密度则前者是后者的 2.5 倍。从图中还可以看出，成组药包爆破的应力波参数比单个药包衰减更慢。

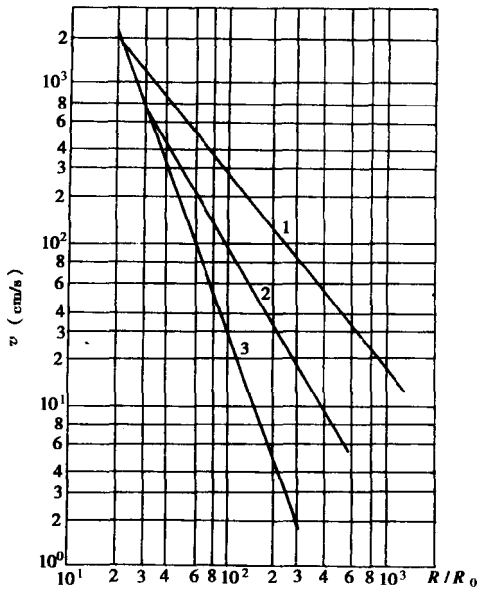


图 1-5 质点移动速度和距离的关系曲线  
1-石灰岩中，成组药包；2-石灰岩中，单个药包；3-煤中，成组药包

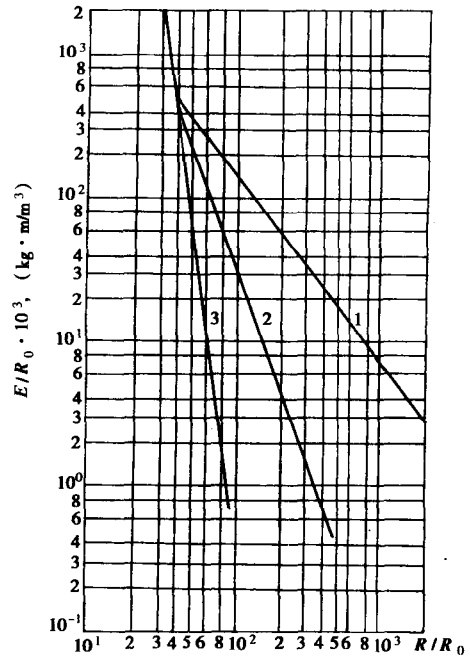


图 1-6 折合成能流密度与距离的关系曲线  
1-石灰岩中，成组药包；2-石灰岩中，单个药包；3-煤中，成组药包

## 1.2 爆破漏斗

炸药在介质中爆炸时，爆轰波由药包中心向四周传播，造成介质向外产生径向运动，这种运动在无限介质中受到外层介质的阻挡和限制。但是，如果在药包附近存在自由面时，由于外层介质的阻力不够大，就会使药包到自由面之间的介质产生径向位移，同时大部分应力波从自由面反射回来成为拉伸波。虽然反射拉伸应力就其绝对值而言要比初始的压缩应力值小，但岩石的抗拉强度较其抗压强度小的多，因此反射拉伸波造成的破坏范围较大，见图 1-7。

对一定重量的药包  $Q$  在介质中产生的爆炸作用范围  $R$  是一定的 当  $R$  大于  $W$  (药包中心到自由面的最小距离) 时会引起自由面 (或称地表) 的明显变化 其爆破破坏 抛掷 方向由最小抵抗线的方向来确定 这是因为该处的阻力最小 爆破作用首先在这里冲破一个缺口而将岩石破碎并推出。这个爆坑称为爆破漏斗。由于不同性质药包会产生各种不同的爆炸漏斗, 根据药包爆破作用的表现不同可分为以下几种形式。

#### (1) 内部作用药包

当  $R$  小于  $W$  时 由于能量的衰减 反射拉伸波在自由面造成的破坏不大, 且压缩应力波和反射拉伸波分别造成的裂隙不能互相连接和交叉, 所以在地面看不到显著的破坏, 这种爆破作用称为内部作用药包。

#### (2) 松动药包

随着  $W$  的减小, 到达自由面的压缩应力波强度增大, 在自由面反射拉伸应力造成的破坏程度也增大。当  $W = R$  时, 由压缩应力波和反射拉伸波造成的两组裂隙互相连接起来形成一个统一的破坏区。这时可以见到地表产生明显的外部破坏, 在爆轰气体的作用下, 地表甚至产生隆起的现象, 这种爆破作用称为松动作用药包, 相应的爆破漏斗称为松动爆破漏斗。

#### (3) 抛掷爆破药包

随着  $W$  的进一步减小, 炸药爆轰引起的岩石内应力超过药包周围岩石的极限抗压强度, 使岩石不仅产生破坏 而且将被过剩的能量 通过高温高压爆轰气体产物的膨胀 向外抛出 这时称为抛掷爆破作用药包, 相应的药包称为抛掷爆破药包, 其爆破漏斗称为抛掷爆破漏斗。

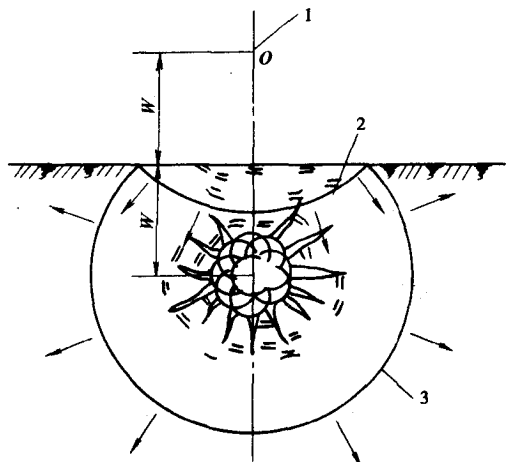


图 1-7 波反射镜像原理

1-反射波中心;2-反射波阵面;3-爆轰波阵面

### 1.2.1 爆破的内部作用

内部作用药包爆炸时, 如果切开爆破后的岩体就可看到图 1-8 所示的情况。从图中可知, 随着至爆源的距离的增大, 岩石破坏特征发生明显变化, 大致可分为三个区域。

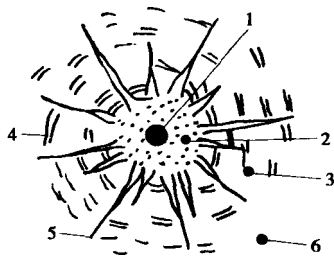


图 1-8 无限介质中的破坏分区

1.药包;2.压碎圈;3.破碎圈;4.环向裂隙;5.径向裂隙;6.震动圈

#### (1) 压缩圈

密闭在无限介质中的药包爆炸时, 一般可达到  $5\ 000 \sim 10\ 000\text{MPa}$  的超高压, 这个数值远远超过最坚韧岩石的动抗压强度。装药空间岩壁表层受到强烈压缩而形成空腔, 这个空腔就叫压缩圈。对于大多数在冲击荷载作用下表现明显脆性的岩石来说 其压缩性不明显 该区内岩石多被压成粉末 因此又叫粉碎圈、压碎圈。压缩区范围很小, 其半径一般不超过药室半径的 2 倍。

#### (2) 破碎圈

当冲击波进入压碎圈以外的岩体时, 岩体受到衰减后的应力波压缩作用而产生径向位移并引起切向拉伸。如果拉应力超过岩体的动态抗拉强度, 便在岩体内产生放射状的径向裂隙, 裂隙发展速度约为岩石中纵波传播速度的  $0.15 \sim 0.4$  倍。随

着爆炸产生的高压气体挤入裂隙，可促使原有裂隙进一步扩大或延伸。应力波通过后，受压缩的岩体因弹性释放，又发生反向的径向运动，产生径向拉应力形成环向裂隙。这些裂隙相互交叉贯通，将岩体破碎，形成破碎圈。其半径约为装药半径的 8~10 倍。

### (3) 振动圈

在破碎区外围的岩体，由于压缩区和破碎区的消耗和衰减，剩余的爆炸能量以不足于造成岩石的破坏而只能引起弹性振动，这个范围比前两圈大的多，称作振动区圈。

## 1.2.2 集中药包的爆破漏斗

### 一、水平自由面的爆破漏斗

水平自由面的爆破漏斗(图 1-9)是研究岩石可爆性能最常用的试验方法。在爆破漏斗中最重要的特征参数是爆破作用指数  $n$ ，它与药包重量、最小抵抗线和炸药性质、岩石性质等因素有关。

$$n = \frac{r}{W} \quad (1-3)$$

式中： $r$ ——爆破漏斗的半径，m；

$W$ ——最小抵抗线，m。

当  $0 < n < 0.75$  时为松动爆破，此时无岩块抛掷现象发生，见图 1-10

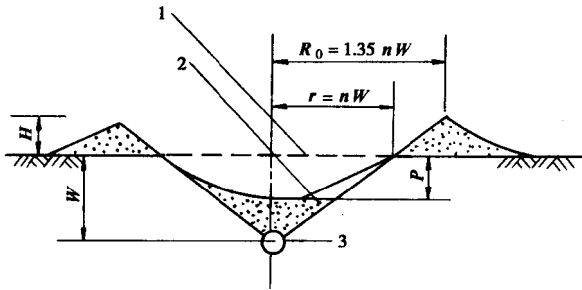


图 1-9 水平地面爆破漏斗

1-原地面线；2-爆后轮廓线；3-药包；P-可见漏斗深度；H-漏斗外堆积高度； $R_0$ -堆积最高处至药包中心的距离

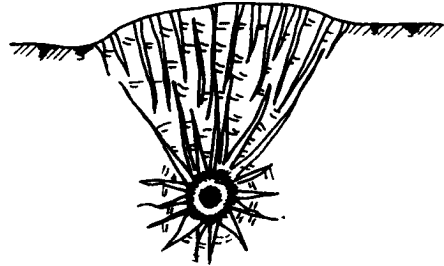


图 1-10 松动爆破漏斗

$0.75 < n < 1$  时为减弱抛掷爆破 爆破漏斗的张开角小于  $90^\circ$ ；

$n = 1$  时为标准抛掷爆破 爆破漏斗的张开角等于  $90^\circ$  此时爆炸  $1\text{m}^3$  岩石所需的炸药量为该岩石的单位用药量 用  $K$  表示 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ；

$n > 1$  时为加强抛掷爆破，爆破漏斗的张开角大于  $90^\circ$  见图 1-11。

### 二、斜坡地面的爆破漏斗

在爆破工程中，自由面在大部分情况下是位于斜坡地面上。由于地形变化及重力作用使爆破漏斗形状发生了显著变化，在坡面形成一个下部近似为半圆形、上部为椭圆形的爆破漏斗，见图 1-12和图 1-13。在两侧和下部的破裂范围没有明显改变，其破碎边界用下破裂线  $R$  表示，上部的

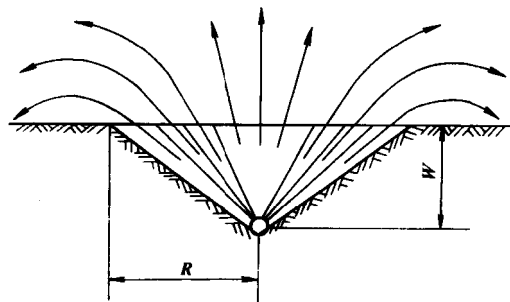


图 1-11 抛掷爆破漏斗

破碎边界用上破裂线  $R'$  表示。由于岩石结构、自重等原因,  $R'$  比  $R$  明显增大。

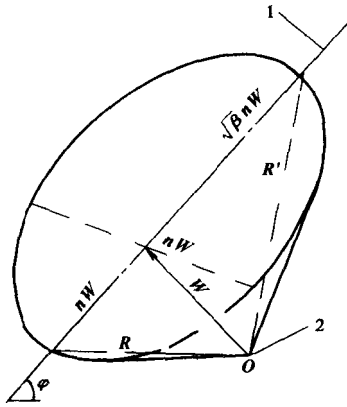


图 1-12 斜坡地面的爆破漏斗立体图

1-斜坡地面线 2-药包中心

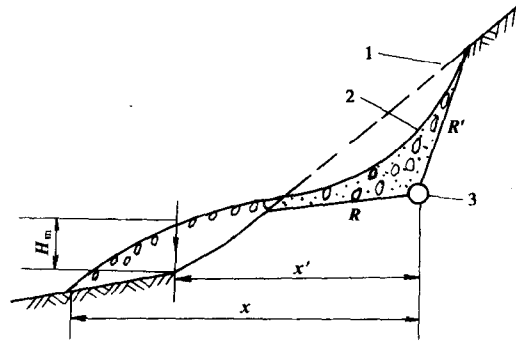


图 1-13 斜坡地面的爆破漏斗断面图

1-斜坡地面线;2-爆后地面线;3-药包中心

$$R = \sqrt{1 + n^2} W \quad (1-4)$$

$$R' = \sqrt{1 + \beta n^2} W \quad (1-5)$$

式中:  $R$ ——下破裂线  $m$ ;

$R'$ ——上破裂线  $m$ ;

$\beta$ ——破坏系数 对于土质、松软石、次坚石  $\beta = 1 + 0.04(\varphi/10)^3$  对于坚岩和完整岩石

$$\beta = 1 + 0.016(\varphi/10)^3;$$

$\varphi$ ——地面倾角( $^\circ$ );

其余符号同前。

### 1.2.3 条形药包的爆破漏斗

#### 一、条形药包爆破漏斗的基本形式

由于条形药包的装药形式不同, 爆破的漏斗形式呈现出特殊性, 根据试验结果显示: 条形药包的爆破漏斗在水平地面为椭圆形 横断面为圆三角形 纵断面为梯形 见图 1-14。

#### 二、条形药包爆破漏斗的变化规律

条形药包爆破漏斗的变化主要受药包抗径比  $\Psi = W/d$  ( $W$ ——药包的最小抵抗线,  $d$ ——药包直径) 和长抗比  $\eta = L/W$  ( $L$ ——药包长度) 两个参数的影响。药包抗径比  $\Psi$  是决定药包爆破性质的主要因素, 也即为决定爆破漏斗开口宽度变化的主导值 (见表 1-1)。 $\Psi$  越小开口宽度和长度越大 当  $\Psi > 40$  时爆破漏斗长度小于药包长度。当  $1.0 \leq \eta < 4.0$  药包长抗比  $\eta$  的增减在一定程度上影响爆破漏斗宽度; 当  $\eta \geq 4.0$  以后, 条形药包爆破漏斗开口宽度趋于稳定, 爆破漏斗的地面形状成为两条平行直边两个端部的形状, 中心开口宽度不再增加。

#### 三、斜坡地形的条形药包爆破漏斗

在斜坡地形布置条形药包时, 根据爆破用途不同有两种布置方法, 在一般工程爆破中往往使药包和等高线的走向平行, 这样能够充分发挥药包的爆破作用; 在山体开沟和硐库布置中, 为便于施工则把药包和等高线的走向垂直布置, 因此条形药包的爆破漏斗有两种不同的情况。

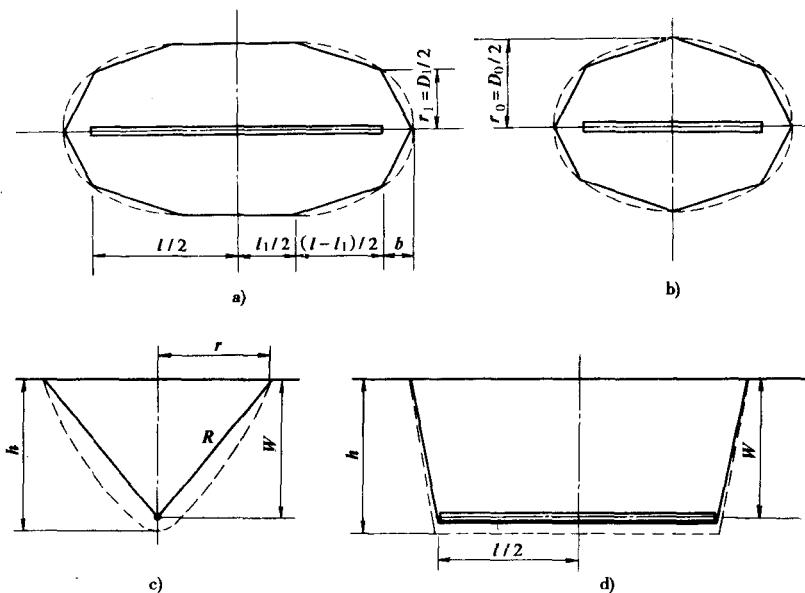


图 1-14 条形药包爆破漏斗示意图 (虚线为实际情况, 实线为测量点连线)  
 a)  $\eta \geq \eta_{\perp}$  时漏斗地面轮廓线; b)  $\eta_F < \eta < \eta_{\perp}$  的漏斗地面轮廓线; c) 横断面; d) 纵断面

条形药包爆破漏斗的变化规律

表 1-

药包抗径比 $W/d$	径 向	轴 向
$< 28$		
$30 \sim 35$		
$> 35$		

(1) 在斜坡地形药包平行于等高线的条形药包爆破漏斗

为了了解条形药包的爆破漏斗形状, 国内外爆破工作者进行了大量的试验研究, 图 1-15 是斜坡地形条形药包的爆破漏斗实测图。可以发现条形药包爆破时上破裂线也比平地爆破时要大, 可近似按式 (1-5) 进行计算。但爆破漏斗的侧向宽度, 则直接与条形药包长度有关。

(2) 在斜坡地形药包垂直于等高线的条形药包爆破漏斗

药包垂直等高线布置时, 爆破漏斗的对称性遭到破坏, 随着倾角  $\alpha$  的增大, 后破裂线的水平距离越来越小, 甚至成为负值 (即后破裂线水平投影落在药包长度以内), 如图 1-16 a) 所示。

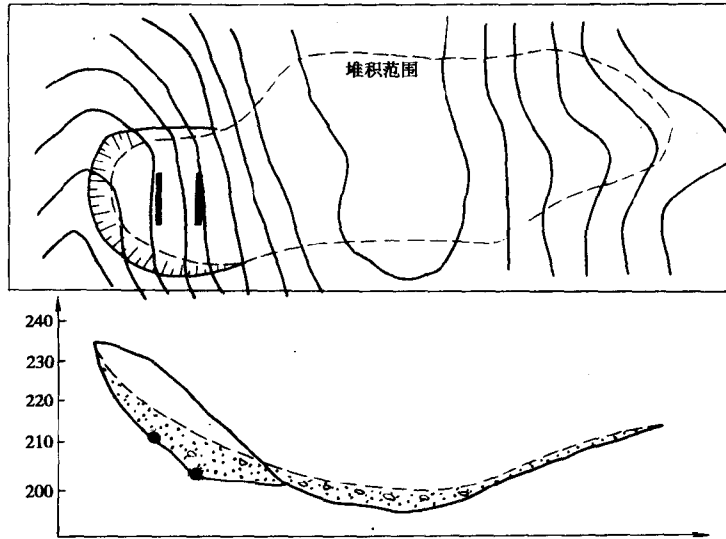


图 1-15 斜坡地形条形药包爆破漏斗 (药包平行于等高线)

此时爆破漏斗呈簸箕形并随地面倾角  $\alpha$  的增大变成后壁近于垂直的直立漏斗。从图 1-16b)上看,其纵向破坏长度逐渐减小,横向开口宽度越来越大,口部破坏加剧。这种变化显然是由于药包轴向长度内中心点处抵抗线不同所引起的。

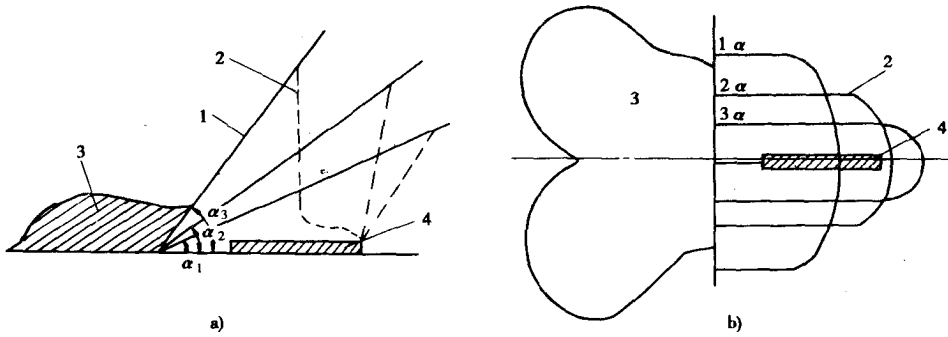


图 1-16 斜坡地形条形药包爆破漏斗 (药包垂直于等高线)

a)剖面图 b)俯视图

1-原地面线;2-后破裂线;3-爆堆;4-药包

#### 1.2.4 利文斯顿爆破漏斗理论

利文斯顿 (C. W. Livingston) 爆破漏斗理论是 1956 年提出的以能量平衡为准则,以爆破漏斗试验为依据 阐述岩石在不同装药量、不同埋置深度等条件下 其爆炸能量分配、爆破漏斗规律及其相互关系的一种爆破理论。目前已被国内外爆破工作者应用于对比改进炸药性能、评价岩石的可爆性、工程爆破中的爆破参数选取等方面。

##### 一、利文斯顿爆破漏斗理论要点

该理论认为炸药在岩体内爆破时,传递给岩石的能量的多少和传递速度的快慢,取决于岩石性质、炸药性能、药包重量、炸药埋放位置的深度和起爆方式等因素。在岩石性质一定条件下,爆破能量的大小取决于药包的炸药量、爆炸能量的释放速度与炸药起爆的速度。假设有一

定重量的炸药置于地表下某一深处爆炸，它所释放的绝大部分能量被岩石所吸收。如果岩石所吸收的能量达到饱和状态时，岩体表面开始产生位移、隆起、破坏，以至抛掷出去；如果没达到饱和状态，岩石只呈弹性变形，不被破坏。也就是说，在炸药量一定的条件下，如果将药包逐渐向地表移动并靠近地表爆炸时，传给岩石的能量比率将逐渐降低，而传递到空气中的能量比率则逐渐增高。

## 二、岩石爆破的四种破坏形态

利文斯顿根据爆破能量作用效果的不同，将岩石爆破时的变形和破坏形态分为以下四种类型：

### (1) 弹性变形

地表下埋置很深的药包的爆破（即所谓约束爆破或称为内部作用爆破），爆破时地表岩石不会遭受破坏，爆炸能量完全消耗于药包附近药室壁的压缩（粉碎）和振动区的弹性变形。如药量不变，当药包埋置深度减小到某一临界值时，地表岩石开始发生明显破坏。脆性岩石将“片落”塑性岩石将“隆起”。此时药包埋置深度的临界值称为“临界深度”即爆破破坏刚好由内部爆破作用转为松动爆破作用的最大埋置深度，它表征为岩石表面开始破坏的临界值，亦即岩石不破坏而只呈弹性变形的上限值，以下式表示：

$$H_L = E_b \sqrt[3]{Q} \quad (1-6)$$

式中： $H_L$ ——药包为  $Q$  时的临界深度，m；

$Q$ ——炸药量，kg；

$E_b$ ——岩石变形能系数，m/kg<sup>1/3</sup>。

利文斯顿认为， $E_b$  的物理意义为在一定的装药量  $Q$  条件下，岩石表面开始破裂时可能吸收的最大爆破能量。爆破能量低于此值时，岩石表面只产生弹性变形而无明显破坏；超过此能量限度，则岩石表面将由弹性变形转化为破裂。很明显， $E_b$  的大小也是衡量岩石爆破性难易程度的一个指标。加拿大工业有限公司对几种岩石的实测结果表明， $E_b$  值在 4~11m/kg<sup>1/3</sup> 之间。

### (2) 冲击破坏（破碎）

如果药包重量不变，埋置深度从临界深度值再进一步减小，则地表岩石的“片落”现象更加显著，爆破漏斗体积增大。当药包埋置深度减小到某一界限值时，爆破漏斗体积达到最大值。这时的埋置深度就是冲击破坏状态的上限，称为最佳深度  $H_0$ ，此时爆破能量有效利用率最大。

药包埋置深度与临界深度之比称为“深度比”并以  $\Delta$  表示，即  $\Delta = H/H_L$ ，药包埋置深度  $H$  则可写为

$$H = \Delta E_b \sqrt[3]{Q} \quad (1-7)$$

利文斯顿称此公式 (1-7) 为一般方程。

当药包埋置深度为最佳深度  $H_0$  时  $\Delta_0 = H_0/H_L$  称为最佳深度比，则最佳深度为

$$H_0 = \Delta_0 E_b \sqrt[3]{Q} \quad (1-8)$$

通过爆破漏斗试验求出  $E_b$  值及  $\Delta_0$  的值，则当现场所用药量  $Q$  值为已知时，可以利用上式求出最佳深度  $H_0$ ，以此作为最小抵抗线进行爆破即可获得最佳爆破效果。

$\Delta_0$  值随岩石性质的不同而差异很大。在脆性岩石中  $\Delta_0$  值较小，约为 0.5~0.55，在塑性岩石中  $\Delta_0$  值较大，约为 0.9~0.95。

### (3) 碎化破坏（抛掷）

如果药包重量继续保持不变,药包埋置深度从最佳深度继续减小,则生成的爆破漏斗体积也相应减小而漏斗内的岩石的块度将进一步碎化,岩块抛掷距离、空气冲击波和声响增大。当药包埋置深度继续减小到某一定值时,传递给大气的爆炸能开始超过岩石吸收的爆炸能,这一埋置深度称为“转折深度  $H_g$ ”。

岩石呈碎化破坏状态的下限为最佳深度,上限为转折深度。在此范围内依然会产生相应大小的爆破漏斗。

#### (4)空气中爆炸

如药包重量继续保持不变,而药包埋置深度小于转折深度时,岩石破碎加剧、岩块抛移更远、声响更大、爆炸能量传给大气的比率更高而被岩石吸收部分的比率更低。其下限为转折深度,上限深度等于零(地表裸露爆破)。

从上述分析可知,除第一种情况外,其它三种爆炸能量做功的形态都包含爆破漏斗的形成。当药包重量  $Q$  值固定不变时,爆破生成漏斗的体积依药包埋置深度而变化。为了弄清漏斗的特性,必须进行漏斗爆破试验,对不同埋置深度下漏斗体积进行精确测量。漏斗体积同埋置深度的关系是埋置深度由大变小时,漏斗体积由小变大,埋置深度为最适宜深度时,漏斗体积达到最大,此后埋置深度进一步减小,则漏斗体积又逐渐减小。

因此,根据爆破的要求和岩石特性,合理地确定炸药埋深(最小抵抗线)和炸药量,对提高爆破的技术经济效果有着重大意义。

#### 三、破碎过程方程

从爆破漏斗过程中可以得知,爆破漏斗体积  $V$  是药包埋置深度  $H$  的幂函数,即

$$V = f(H^3) = H_1^3 \Delta^3 \quad (1-9)$$

令  $\Delta^3 = ABC$  则

$$V = ABCH_1^3 = ABCE_b^3 Q \quad (1-10)$$

或

$$V/Q = ABCE_b^3 \quad (1-11)$$

式中： $A$ ——能量利用系数，主要由药包实际埋置深度决定；当  $H = H_0$  时  $A = 1$  为最大值；

$B$ ——岩石、炸药性质指数，当岩石和炸药不变时， $B$  值随药包重量  $Q$  而变。如果  $Q$  值也不变，则进行不同埋置深度的漏斗爆破试验的  $B$  值等于 1；

$C$ ——应力分布系数，取决于药包形状、炮眼布置方式、装药结构、地质构造条件等因素。对集中药包  $C = 1$ 。

利文斯顿称公式 (1-11) 为破碎过程方程。

#### 四、爆破漏斗特性曲线

爆破漏斗特性曲线是指漏斗体积与装药埋置深度的关系曲线，它是通过一系列的爆破漏斗试验绘制的。

利文斯顿提出了以能量平衡为准则的爆破漏斗理论之后，国内外爆破工作者从实验室到生产现场，对不同炸药、不同药量、不同装药形状、不同岩石和不同埋深等各种条件进行了大量对比试验，用爆破漏斗特征曲线进一步确定了爆破漏斗理论的科学性和实用性。

##### (1) $V-H$ 曲线

最基本的爆破漏斗特性曲线是  $V-H$  曲线。它是炸药量一定时，随着炸药埋深  $H$  的变化，爆破漏斗半径  $r(r-H)$ 、爆破漏斗深度  $P(P-H)$  和爆破漏斗体积  $V(V-H)$  的变化规律。

试验结果表明，不同岩石的爆破漏斗都有一个最优的药包埋深(最小抵抗线)及与其相应的爆破漏斗半径、深度、体积最大值。

## (2) $V/Q-\Delta$ 曲线

为确切表征爆破漏斗特性，排除由于炸药量变化对爆破效果的影响，可用单位药量爆出的爆破漏斗体积  $V/Q, \text{m}^3/\text{kg}$  作纵坐标，用炸药任意埋深  $H$  与临界深度  $H_L$  的比值  $\Delta = H/H_L$  作横坐标来描绘其变化规律，从而能明显地找到最佳深度  $H_0$  与临界深度  $H_L$  的比值  $\Delta_0 = H_0/H_L$ 。图 1-17 为利文斯顿在铁燧岩中做爆破漏斗试验所得特性曲线。大量试验表明，对于脆性岩石  $\Delta_0 \approx 0.6$ ，塑性岩石  $\Delta_0 \approx 1.0$ 。理论上，对于某种特定岩石来说， $\Delta_0$  是一常数。

## (3) 爆破漏斗特性曲线带（区域）

由于岩石的各向异性和不均质性，以及判别爆破岩块块度大小的标准不同等因素的影响，特别是生产现场岩体结构原生裂隙与多次爆破次生裂隙的影响，虽然炸药埋深条件相同，但爆破漏斗半径、可见深度等数据不可能为某一定值，而是有一个波动范围。美国密苏里大学克拉克教授 C. B. Clark) 加拿大皇后大学鲍尔教授 (A. Bauer) 将利文斯顿的爆破漏斗特性曲线发展为特性曲线带。图 1-18 即鲍尔绘制的花岗岩爆破漏斗特性曲线带图。

鲍尔通过实验认为，当最小抵抗线  $W/Q^{1/3}, \text{m}/\text{kg}^{1/3}$  比值等于 1.5~2.5 时，漏斗半径与药量  $r/Q^{1/3}, \text{m}/\text{kg}^{1/3}$  比值最大。此时的爆破效果最好，岩体完全破坏，块度小而均匀；如果增大与药量最小抵抗线比值，则大块增多、岩体的破坏不完全，留有根底。

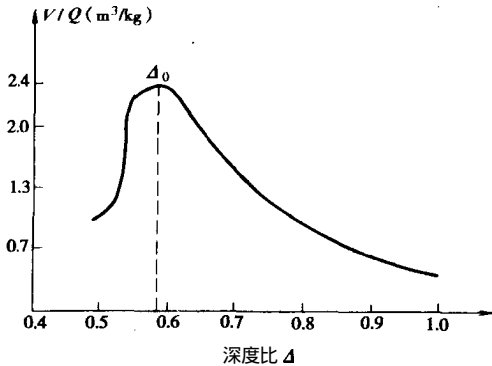


图 1-17 铁燧石的  $V/Q-\Delta$  曲线

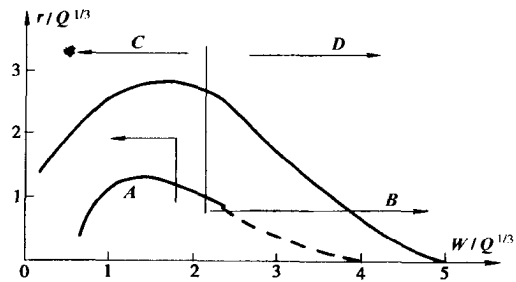


图 1-18 花岗岩爆破漏斗特征线

A- 完全破坏; B- 不完全破坏, 留根底; C- 小块爆堆; D- 大块爆堆

利文斯顿爆破漏斗理论是建立在能量平衡准则及实际爆破试验基础上的，经过几十年的试验研究和实际应用，目前仍在不断改进和完善中。

### 1.2.5 台阶爆破的爆破漏斗

台阶爆破属于双自由面爆破，条件较好，因此单位炸药量的爆破方量较大。

单孔台阶爆破，当爆破参数选择合理时，爆破漏斗在顶面的形状呈左右对称的半椭圆形，如图 1-19a) 所示。台身在药量不变的条件下，漏斗长短轴之比  $f$  随药包长径比  $L/d$  的增大而增大。在竖直自由面上漏斗呈古钏形，如图 1-19b) 所示。纵剖面内的形状与其一半类似，见图 1-19c)。随着  $L/d$  值的减小，顶面上半椭圆形的爆坑逐渐向半圆形逼近， $f$  值减小。由此可见药柱上端部的作用效应类似于一个集中药包。

在两自由面的条件下，保持药包直径  $d = \text{const}$  时，随着药包长度  $L$  向下延伸（也即长径比增大，药量增大），在一定的长径比范围内当两种变化方式的对应药量相同时，顶部破坏差异并不明显，而底部破坏状况则渐趋增强。另一方面，随着  $L$  的增加，漏斗体积逐渐增大。试验表明，在  $L/d = 77$  时，抵抗线  $W = 26d$  可获得最大的漏斗体积。

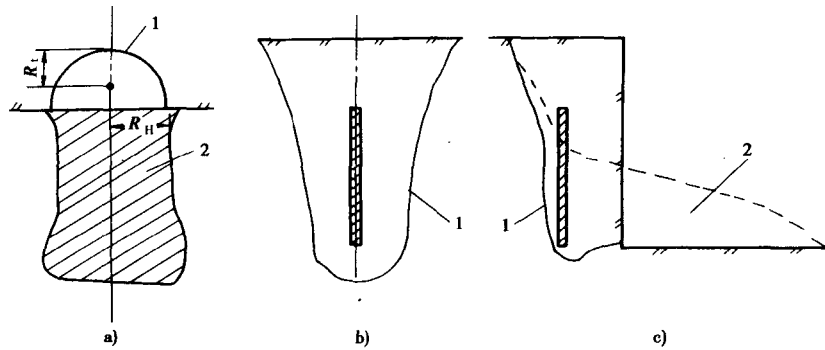


图 1-19 台阶爆破的爆破漏斗示意图

a)俯视图;b)正面图;c)剖面图

1漏斗边缘 2爆堆

近年来有实验证明：最佳埋深，即获得最大漏斗体积时的  $W$  数值 并不一定就是获得最佳破碎块度要求时的合理抵抗线数值，但通过变换  $W$ 、 $L$ 、 $d$  三者关系所做的台阶爆破漏斗试验，可获得满足一定破碎块度要求的合理抵抗线数值，这说明延长药包受介质和药包两个方面的影响要比集中药包复杂一些。

台阶爆破时，药包上部具有两个自由面，药包下部只有一个自由面，下部超深部位受到底盘的夹制作用。试验表明：竖直放置的延长药包与水平放置的延长药包相比有着许多完全不同的作用特点，其两个端头和柱部的几何对称性都已遭到破坏，随着药包长径比的增加，其柱部破坏的不对称性渐趋减弱（但不可能达到水平延长药包那样的均匀程度），两个端头的破坏特征则愈加差异明显。这一点，根据我们的观察无论是初期裂隙的发生和发展，或是最终的宏观状态，都是如此。其原因一方面是自由面位置产生的上下端部的不同应力状态的影响，另一方面，竖直延长药包不可避免地受到重力作用的影响，空腔和裂隙的发展过程中的初期微小差异在台阶条件下被逐渐加剧，使后期气体能量的作用产生向上移动的趋势，因而造成两端明显不同的破坏形态。

台阶爆破的破碎范围和鼓包 岩石 运动示意图 1-20。合理的设计应使台阶的上部和侧面均在爆炸应力波和反射波的作用下得到充分破碎。但是当堵塞长度过大时，台阶顶部的反射波强度不能使岩石充分破碎 伴之产生大块 有时会同形成伞沿 当堵塞长度太小时 顶部的反射应力波强度太大 使顶部产生漏斗形破坏（即后冲）并伴随着产生大量的飞石 对周围环境造成不良的影响。比较合理的堵塞长度是  $(25 \sim 30)D$  ( $D$ ——炮孔直径)。当底盘抵抗线太大时，台阶侧面的反射波强度不能使底部岩石达到满意的破碎效果，往往留下根底和岩坎，所以台阶爆破，炮孔要留有超深。

通过单孔台阶爆破漏斗的分析，为成排、多列深孔台阶爆破及其起爆方式提供了设计基础。

### 1.2.6 掘沟爆破的爆破漏斗

掘沟爆破通常只有一个自由面，并且炮孔与自由面垂直，爆破条件比较差，其爆破漏斗特性可用利文斯顿理论分析。

单孔爆破时，因采用延长药包且炮孔直径受到一定限制，因此其爆破漏斗和集中药包相比有明显的差别 主要特点是爆破漏斗的底部达不到孔底或药包中心的深度 见图 1-21a)。