



# 土石方爆破工程施工工艺

在进行建筑工程施工时，通常都要进行大量的土石方开挖，爆破则是最常用的施工方法之一。爆破是利用工业炸药爆炸时释放的能量，使炸药周围的一定范围内的土石破碎、抛掷或松动。因此，在施工中常用爆破的方式来开挖基坑和地下建筑物所需要的空间，如山体内设置的水电站厂房、水工隧洞等。也可以运用一些特殊的工程爆破技术来完成某些特定的施工任务，如定向爆破筑坝、水下岩塞爆破和边界控制爆破等。

## 第一节 爆破器材的使用

### 一、常用的工业炸药

炸药不仅用于军事目的，而且在建筑、交通、矿冶等行业部门得到了广泛的应用。为确保安全生产，要求非军事部门所使用的工业炸药要具有爆炸性能好、使用安全、爆炸后产生的有害气体少、成本价格低等特点。因此，我国生产的工业炸药是以硝酸铵为主要原料制作的，其种类有：铵梯炸药、铵油炸药、铵松蜡炸药以及浆状抗水炸药和硝化甘油炸药等。

#### 1. 铵梯炸药

铵梯炸药是硝铵类炸药的一种，主要成分为硝酸铵和少量的梯恩梯（三硝基甲苯）及少量的木粉混合而成。其中梯恩梯是单质烈性炸药，具有较高的敏感度。铵梯炸药中加入少量的梯恩梯成分，能使铵梯炸药具有一定程度的威力和敏感度。

由于梯恩梯的制造工艺复杂，价格较高，因此在工业炸药中的使用受到限

制。在工程爆破中常使用无梯或少梯的其他种类炸药。

在工程爆破中,以 2<sup>#</sup> 岩石铵梯炸药为标准炸药,由硝酸铵 85%、梯恩梯 11%、木粉 4% 并加少量植物油混合而成,其爆力为 320mL、猛度为 12mm,用工业雷管可以顺利起爆。在使用其他种类的炸药时,其爆破装药用量可用 2<sup>#</sup> 岩石铵梯炸药的爆力和猛度进行换算。

## 2. 铵油炸药

其主要成分是硝酸铵、柴油和木粉经混合配制而成。由于不含梯恩梯而敏感度稍差,但材料来源广、价格低、使用安全、易加工配制。铵油炸药的爆破效果较好,在中硬岩石的开挖爆破和大爆破中常被采用。

铵油炸药的配制方法可根据原料的性质、加工制作条件和使用目的不同而略有差异。一般是按原料成分中所含元素在爆炸反应后能否达到氧平衡,并结合炸药的敏感度和爆力等主要性能,经试验后确定配制方法。例如细粉状铵油炸药的配比为 92:4:4(硝酸铵:柴油:木粉),药卷密度为  $0.85 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$ ,爆力为 280~320mL,猛度为 9~13mm。其配制加工工艺流程如图 9-1 所示,此加工工艺为热加工工艺,加工制作的质量取决于能否达到干、细、匀、密的工艺要求。

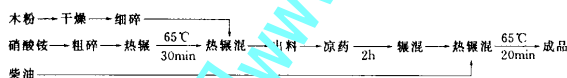


图 9-1 细粉状铵油炸药加工工艺流程

## 3. 铵松蜡炸药

此种炸药是用松香、石蜡这类憎水性材料取代柴油,克服铵油炸药吸湿性强、保存期短的缺点,同时还保持了铵油炸药的材料来源广、价格低、使用安全、易加工配制等优点,爆力和猛度等性能指标可以达到 2<sup>#</sup> 岩石铵梯炸药的标准。

## 4. 浆状抗水炸药

此种炸药是由硝酸铵、梯恩梯、水、胶凝剂、助胶剂等基本成分组合而成的混合物,其外观类似浆糊,呈半流态,有良好的可塑性和抗水性,故称之为浆状抗水炸药。该炸药具有材料来源广、价格低、密度高、爆破威力大且使用安全等特点,

不足的是其敏感度低于一般的硝铵类炸药,不能用常用的工业雷管起爆,要用专门制作的强力起爆药包才能起爆,一般用于露天深孔爆破。

## 5. 硝化甘油炸药

这种炸药的主要成分有敏化剂(硝化甘油)、氧化剂(硝酸铵或硝酸钾)、吸收剂(胶质棉)、疏松、可燃剂(木粉)等,使其呈黄色可塑性胶体,故又叫胶质炸药。硝化甘油炸药具有爆力大、敏感性强、装药密度大、抗水性能好等特点,适用于浅孔爆破和 underwater 爆破。

# 二、炸药的基本性能

## 1. 爆力和猛度

炸药的爆力是指炸药在介质内爆炸做功的总能力。爆力的大小取决于炸药爆炸后产生的爆热、爆温及爆炸生成气体量的多少。爆热越大,爆温则越高,爆炸生成的气体量也就越多,形成的爆力也就越大。爆力的测定通常采用铅铸体扩大法(图 9-2)来测定,即在圆柱状的铅铸体中心钻一圆孔,装入 10g 标准炸药,使用 8<sup>#</sup> 工业雷管起爆,测量出爆炸前后铅铸体中圆孔的容积差值,以 mL 为计量单位表示该炸药爆力的大小。

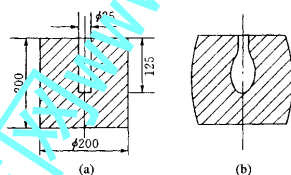


图 9-2 测爆力用的铅铸体

(a)爆炸前 (b)爆炸后

猛度是指炸药爆炸时对介质破坏的猛烈程度,是衡量炸药对介质局部破坏的能力指标。猛度的测定是将 150g 标准炸药放在一铅柱体上,用 8<sup>#</sup> 工业雷管插入炸药内 15mm 深处,起爆后铅柱体被爆轰力压缩成蘑菇状,如图 9-3 所示,以爆炸前后铅柱体的高差值(mm)为计量单位,表示该炸药猛度的大小。

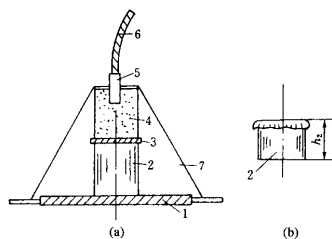


图 9-3 铅柱压缩猛度试验

(a)爆炸前 (b)爆炸后

1—钢板(厚 20mm) 2—铅柱( $h_1 = 60\text{mm}$ ) ;

3—钢片( $d = 41\text{mm}$ 、厚 10mm) ; 4—药包

( $d = 40\text{mm}$ 、重 50g) 5—雷管 ;

6—导火索 ; 7—拉紧绳

爆力和猛度都是炸药爆炸后做功的表现形式,所不同的是爆力是反映炸药在爆炸后做功的总量,对药包周围介质破坏的范围。而猛度则是反映炸药在爆炸时,生成的高压气体对药包周围介质粉碎破坏的程度以及局部破坏的能力。一般爆力大的炸药其猛度也大,但两者并不成线性比例关系。

## 2. 氧平衡

工业炸药的主要成分是碳、氢、氧、氮等化学元素。氧平衡是指炸药在爆炸分解时的氧化情况。在炸药的爆炸过程中,氧元素分别与碳、氢元素发生剧烈的氧化反应,生成以气体为主的爆炸产物,其中以炸药中所含的氧元素能否满足碳、氢元素充分氧化,这就是关于炸药的氧平衡问题。根据炸药成分的配比不同,氧平衡具有以下三种情况。

(1) 零氧平衡。炸药中的氧元素含量与可燃物完全氧化的需氧量相等,此时可燃物完全氧化,生成的热量大则爆能也大。零氧平衡是较为理想的氧平衡,炸药在爆炸反应后仅生成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$  并产生大量的热能。如单体炸药二硝化乙二醇的爆炸反应就是零氧平衡反应。

(2) 正氧平衡。炸药中的氧元素含量过多,在完全氧化可燃物后还有剩余的氧元素,这些剩余的氧元素与氮元素进行二次氧化,生成  $\text{NO}_2$  等有毒气体。这种二次氧化是一种吸收爆热的过程,它将降低炸药的爆力。如纯硝酸铵炸药的

爆炸反应属正氧平衡反应。

(3) 负氧平衡。炸药中氧元素含量不足,可燃物因缺氧而不能完全氧化而产生有毒气体 CO,也正是由于氧元素含量不足而出现多余的碳元素,爆炸生成物中的 CO 因缺少氧元素而不能充分氧化成 CO<sub>2</sub>。如三硝基甲苯(梯恩梯)的爆炸反应属负氧平衡反应。

由以上三种情况可知,零氧平衡的炸药其爆炸效果最好,所以一般要求厂家生产的工业炸药至少要接近于零氧平衡。炸药的氧平衡值可用以下公式来表示,即

$$\text{氧平衡值} = \frac{\text{炸药中含氧的克分子量} - \text{可燃物完全氧化所需氧的克分子量}}{\text{炸药总的克分子量}}$$

### 3. 敏感度

敏感度是指炸药在外界能量的作用下,引起爆炸反应的难易程度,它不仅是衡量炸药稳定性的重要标志,而且还是确定炸药的生产工艺条件、炸药的使用方法和选择起爆器材的重要依据。按外界的能量不同,又可分为机械敏感度、热敏感度和爆轰敏感度,其中爆轰敏感度是以殉爆距离予以表示,即爆炸的药包引起相邻药包起爆的最大间隔距离。

### 4. 安定性

安定性是指炸药在贮存期间保持其化学物理性能不变的能力,其包括物理安定性和化学安定性两个方面。物理性质包括吸湿、结块、挥发、渗油、老化、冻结和耐久性等;化学性质是指炸药的原有化学成分及炸药的爆炸能力。

此外,炸药的性能还有爆热、爆温、爆速等。

## 三、起爆器材及其使用

炸药的爆炸是利用起爆器材提供的爆轰能并辅以一定的工艺方法来起爆的,这种起爆能量的大小将直接影响到炸药爆轰的传递效果。当起爆能量不足时,炸药的爆轰过程属不稳定的传爆,且传爆速度低,在传爆过程中因得不到足够的爆轰能的补充,爆轰波将迅速衰减到爆轰终止,部分炸药拒爆。因此,用于雷管和传爆线中的起爆炸药敏感度高,极易被较小的外能引爆;引爆炸药的爆炸反应快,可在被引爆后的瞬间达到稳定的爆速,为炸药爆炸提供理想爆轰的外能。

(一)常用的起爆炸药

起爆炸药多具有敏感度高和爆炸猛烈的性能 ,主要用作装填雷管或起爆其他炸药。装填在雷管中的起爆炸药根据其性能不同又分为正起爆药和副起爆药 ,正起爆药的敏感度极高 ,副起爆药则爆力和猛度大。在雷管的爆炸过程中 ,常将这两种起爆炸药结合使用 ,即先利用正起爆药的高敏感度接受外能起爆而引爆副起爆药 ,再利用副起爆药产生的爆能去引爆工业炸药 ,这也是工业炸药引爆的传统方法。常用的起爆炸药名称和性能如表 9－1 所示。

表 9－1 常用起爆炸药性能比较

起爆炸药名称	比重	密度 ( g/cm <sup>3</sup> )	爆温 ( ℃ )	爆发点 ( ℃ )	每 kg 炸药爆炸效果		爆速 ( m/s )	猛度 ( mm )	爆力 ( mL )
					产生气体 ( L )	产生热量 ( J )			
雷汞	4.42	1.25～1.35	3500～4810	210	304	$15.4\times10^8$	6500	5.3～5.6	110
迭氮铅	4.8	1.25～1.35	4030～4333	325～340	308	$15.9\times10^8$	5300	—	115
正起爆药 三硝基间 苯二酚	3.02	1.0～1.6	2800	315	445	$17.4\times10^8$	4800	—	—
二硝基 重氮酚	1.71	1.3～1.4	4950	170～180	535	$58.6\times10^8$	5400	—	230
副起爆药 特屈儿	1.73	1.0	3900	255	742	$45.1\times10^8$	7200	21～22	340
黑索金	1.82	0.9～1.0	3850	260	908	$60.7\times10^8$	8300～8460	25	600
泰安	1.75	1.54	4010	225	780	$58.6\times10^8$	7474	23～25	580

(二)雷管

雷管是用来起爆炸药或传爆线(导爆索)的。雷管按接受外能起爆的方式不同 ,分为火雷管和电雷管两种。

1. 火雷管

火雷管的起爆是由点燃后的导火线在将要燃完时的尾焰火花引爆的 ,其结构如图 9－4 所示。雷管的管壳多用铜、纸、塑料、铝等材料做成 ,直径 6～7mm ,长度为 35～51mm ,开口端长度不短于 15mm ,以便插入导火线 ,另一端做成聚能穴 ,管内装有正副起爆药和加强帽。加强帽由金属片冲压制作而成 ,其作用可减少正起爆药的外露面积 ,防潮并形成密闭小室 ,促进爆压增大 ,保证雷管的起爆药反应完全。加强帽的



中心有一小孔,孔径为 $2\sim 2.5\text{mm}$ ,导火线的尾焰经小孔引爆雷管,管子垫有一层薄绸,以防起爆药散失。

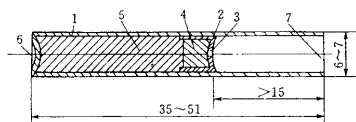


图 9-4 火雷管构造(单位: mm)

1—管壳 2—加强帽 3—中心孔;

4—正起爆药 5—副起爆药;

6—聚能穴 7—开口端

## 2. 电雷管

按起爆时间不同可分为:

(1) 即发电雷管 通电后瞬即爆炸的电雷管(图 9-5)。电雷管结构和火雷管相似,不同之处,在于管内前段装有电点火装置。该装置由脚线、电桥丝及引火剂组成。为了固定脚线和封住管口,在管口段灌以硫磺或装置塑料塞,外面再涂以防水密封胶。即发电雷管也分为 10 个序号。

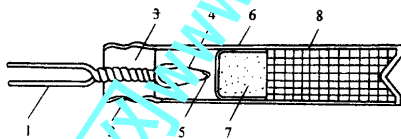


图 9-5 即发电雷管示意图

1—脚线 2—管壳 3—密封塞;

4—桥丝 5—引火头 6—加强帽;

7—正起爆炸药 8—副起爆炸药

(2) 秒延发电雷管 通电后能延迟一秒的时间才起爆的电雷管。秒延发电雷管和即发电雷管的区别,仅在于引火头与正起爆炸药之间安置了缓燃物质(图 9-6)。通常是用一小段精制的导火索作为延发物。秒延发电雷管系列分为 7 段,可根据需要选用。

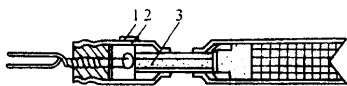


图 9-6 秒延发电雷管示意图

1—蜡纸 2—排气孔 3—精制导火索

(3) 毫秒电雷管 : 它的构造与秒延期电雷管的差异仅在于延期药不同( 图 9-7 )。毫秒电雷管的延期药是极用易燃的硅铁和铅丹混合而成 , 再加入适量的硫化锑以调整药剂的燃烧程度 , 使延发时间准确。它的段数很多 , 工程常用的多为 20 段系列的毫秒电雷管。

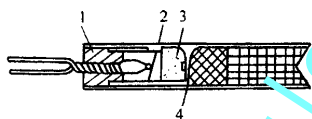


图 9-7 毫秒电雷管示意图

1—塑料塞 2—延期内管 ;

3—延期药 4—加强帽

### (三) 导火线

#### 1. 导火索

导火索是点燃火雷管的配套材料。它是以具有一定密度的粒状或粒状黑火药为索心 , 以棉线、塑料、纸条、沥青等材料卷成的圆形索。导火索借助药芯的燃烧传递火焰来起爆火雷管或黑火药的。

为配合火雷管的使用 , 导火索外径为  $5.2 \sim 5.8 \text{mm}$ 。燃速为  $100 \sim 125 \text{m/s}$  , 燃烧中不应有断火、透火、外壳燃烧、速燃和爆燃等现象发生。点燃导火索药芯的材料应是点火线、点火棒或点火筒。只有单独药包爆破时 , 才允许用火柴或明火点燃。

#### 2. 导电线

导电线是起爆电雷管的配套材料。大量爆破中 , 通常将爆破网路中的电线



按其位置分为以下几种。

(1)端线 :在深孔或露天药室爆破中 ,由于雷管脚线不长 ,引不出孔口或药室 ,需加一段电线称之为端线。

(2)联接线 :联接各孔口或药室之间的电线称为联接线。

(3)区域线 :是联接联接线和主线的电线。

(4)主线 :联接区域线和爆破电源的电线。

### 3. 导爆索

又称传爆线 ,必须用雷管起爆。其品种有普通、抗水、高能和低能四种。普通导爆索有一定的抗水性能 ,可直接起爆常用的工业炸药。水利水电工程中多用此类导爆索。

### 4. 导爆管

是由透明塑料制成的一种非电起爆系统 ,并可用雷管、击发枪或导爆索起爆。管的外径为 3mm ,内径为 1.5mm ,管的内壁涂有一层薄薄的炸药 ,装药量为  $(20 \pm 2) \text{ mg/m}$  ,引爆后能以  $(1950 \pm 50) \text{ m/s}$  的稳定爆速传爆。传爆能力很强 ,即使将管打许多结并用力拉紧 ,爆轰波仍能正常传播 ;管内壁断药长度达 25cm 时 ,也能将爆轰波稳定地传下去。

## 第二节 爆破施工作业施工技术

对于各种爆破方法 ,施工作业的工序一般包括 :钻孔、装药与炮孔堵塞、起爆等。在施工作业中 ,要结合工程的特点 ,因地制宜地选择钻孔设备和钻孔方法 ,按技术要求对各种爆破材料进行加工制作 ,装填炸药 ,正确引爆 ,安全处理瞎炮等。

### 一、火雷管起爆方法

#### 1. 制作起爆雷管

工业雷管中 ,火雷管是最基本的品种 ,共分 10 个序号 ,序号由小到大 ,其中装填的起爆药量依次增多。工程爆破中普遍采用 8<sup>#</sup> 和 6<sup>#</sup> 的纸壳火雷管。火雷管在使用之前应当进行外观检查 ,检查雷管有无变形、受潮及杂物进入开口端等

异常情况,纸壳雷管有效期为1年,其他管壳雷管为两年。

制作起爆雷管是将导火索插入火雷管的开口端并固定,点火后导火索的尾焰射入雷管的正起爆药使其爆炸。制作时,先将导火索按所需长度切断,端头要齐平,然后用宽为2cm的薄纸条在插入雷管的导火索端头外壁缠绕两圈,使外径与雷管开口端的孔径吻合,接着轻轻旋转插入雷管中,使导火索的尾端与雷管的加强帽轻轻接触。插入时,应一手捏住雷管的开口端,另一手捏住缠有纸条的导火索端头旋插。因雷管的敏感度较高,操作时应轻拿轻放,工作台上应铺有橡皮软垫。加工后的起爆雷管如图9-8所示。

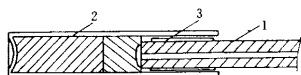


图 9-8 加工好的火雷示意图

1—导火索 2—火雷管 3—卷纸条

## 2. 制作起爆药卷

将制作好的起爆雷管插入药卷中,并用细绳(麻)扎紧而成为起爆药卷。起爆药卷的加工方法如图9-9所示。

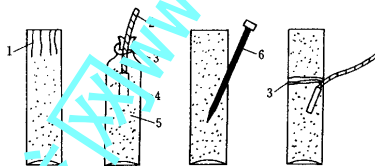


图 9-9 起爆药包加工的两种方法

1—松开 2—导火索 3—麻绳 4—雷管;

5—药包 6—竹、木或铝、铜锥子

制作起爆药卷有两种方法:其一是先将药卷的封口揭开,再在药卷的端部轻轻搓揉并倒出少许松散的炸药,然后将制作好的起爆雷管插入药卷中并用细绳将药卷口扎紧。其二是用竹签或有色金属工具从药卷的侧边插入,然后抽出竹签,再把起爆雷管插入孔眼中后用细绳扎紧。加工制作时,不许将起爆雷管往复

插入药卷中又拉出,以免导火索的尾端拉离加强帽甚至从雷管中拉出,造成误炮。每次爆破多少炮眼就加工多少起爆药卷,不得制备过量。

### 3. 装药及点炮

装药工作虽然简单,但却关系到爆破效果和工作安全,应注意在装药前仔细检查工作面情况,爆破器材是否齐全,炮眼规格是否合乎要求,孔内有无岩碴和透水现象,点火后安全出口是否畅通。还要注意合理安置起爆药卷在炮孔内的位置。起爆药卷位置通常有如图 9-10 所示的三种情况。

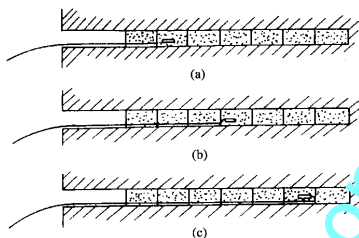


图 9-10 起爆药包在眼内的位置

(a) 在近眼口处 (b) 在中部 (c) 在近眼底处

起爆药卷置于炮眼底部的装药称为反向装药结构,起爆药卷置于炮眼上部的装药称为正向装药结构。不论是正向装药结构还是反向装药结构,在装药时,均应将具有聚能凹穴的药卷其凹穴必须是朝向一致,这样可以提高炸药在爆轰过程中的聚能效果,从而可以增强炸药爆轰的做功能力。当岩石特别坚硬时,反向装药结构的爆破效果会更好,由于药卷的聚能穴朝向临空面,有利于爆轰波向临空面传递。

点炮即点燃起爆雷管上的导火索,专用的点火材料有以下几种类型。

(1) 点火绳。点火绳是用亚麻或棉线在硝酸钾溶液中浸渍,再在表面缠上棉线而成,直径为 6~8mm,亚麻点火绳的燃速为 5~10mm/min,棉线芯均为 4~7mm/min。使用前取 1m 做燃速试验,在同一地点不得使用两种不同燃速的点火绳。点火绳的长度应保证点火人员在点火后能安全撤退到安全区所需的时间来确定。

(2) 点火棒。点火棒是用直径 8~14mm,长 130~150mm 的纸筒,外涂防潮剂,一端装入长度不小于 50mm 的黄土等惰性不燃物,另一端装入燃烧剂而制成。

燃烧剂由擦火头、主火剂和信号剂三部分组成。擦火头起摩擦即燃的作用；主火剂在燃烧时喷出火焰，为点燃导火索的主要部分；信号剂在燃烧时发出绿色火花，作为提醒点火人员及时撤离爆破地点的计时信号。

点火棒燃烧时间约为  $60\sim 70\text{s}$ ，其中主火剂燃  $55\sim 60\text{s}$ ，信号剂燃  $5\sim 10\text{s}$ 。

(3) 带切口的导火索。将普通导火索每隔  $2\sim 3\text{cm}$  斜切一切口，切口深度以露出药芯一半较为适宜。点火时，只需折转切口将其点燃，再用切口处喷出来的火焰去点燃炮孔处的导火线，如图 9-11 所示。

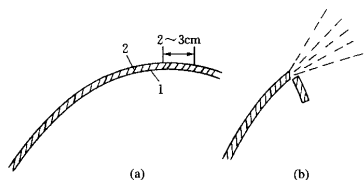


图 9-11 带切口的导火索

(a) 切口情况 (b) 喷火情况

1—导火索 2—切口

电雷管起爆是大中型水利水电工程爆破中最广泛采用的方法。它能远距离操作，且可用仪表检测电雷管和起爆网路的质量。操作安全可靠，而且能分段或同时起爆大规模的药包群。

### 1. 引爆电源

引爆电雷管的电源可以是直流电，也可以是交流电，可以是干电池、蓄电池，也可以是发电机或电力网的动力电源。无论何种电源，每个电雷管所获得的电流都必须大于其额定准爆电流，才能保证每个药包准确起爆。

### 2. 电爆网路的联接方式及计算

电雷管起爆的首要条件，必须用导线把装入炮孔或药室的雷管脚线，按一定顺序联接在一个统一电源的网路上（图 9-12），使之成为一个整体，即为电爆网路。它可将电源供给的电流分配到每一个电雷管，使之具有足够的准爆电流，通电后，能使雷管全部起爆。因此，在设计电爆网路时，要求按照每个具体工程的药包位置和数量，准确地进行计算。根据药包数量、导线种类和电源能量选择电爆网路的联接形式。

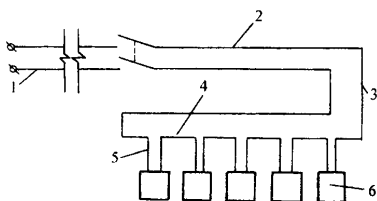


图 9-12 电爆网络的组成

1—电源线 2—主线 3—区域线 4—联接线；  
5—端线 6—脚线(药包)

电爆网络的联接方式一般有串联、并联和混联三种。在电源电压相同的情况下,由于联接方式不同,流经电雷管的电流强度是不同的。但电雷管的电阻是固定的,且每个雷管要求的准爆电流是一定的,能否满足,需要按照欧姆定律进行计算。

(1) 串联网路计算:串联是将电雷管一个接一个互相成串的联接起来,再与电源相连接的方法,如图 9-13 所示。

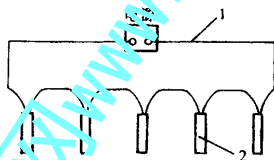


图 9-13 串联电爆网络

1—导线 2—电雷管

这种方法的优点是联接简单,操作容易,所需电流小、电线耗量少。缺点是只要有一个雷管出故障,就会使整个网路断路,产生拒爆。

串联电爆网络的计算方法如下:

电爆网路总电阻  $R$ :

$$R = R_{\text{线}} + nr \quad (9-1)$$

式中  $R_{\text{线}}$ ——电线电阻  $\Omega$  ;  
 $r$ ——单个电雷管的电阻  $\Omega$  ;  
 $n$ ——串联电雷管个数。

电爆网路总电流  $I$  :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_{\text{线}} + nr} \quad (9-2)$$

式中  $I$ ——总电流  $A$  ;  
 $U$ ——电源电压  $V$ 。

通过每个电雷管的电流  $i$  必须满足

$$i = I = \frac{U}{R_{\text{线}} + nr} \geq i_{\text{准}} \quad (9-3)$$

式中  $i_{\text{准}}$ ——每个电雷管的准爆电流  $A$ 。

(2) 并联网路计算 : 并联是将所有电雷管的两根脚线分别联在两条线上 , 然后与电源相连接的方法 , 如图 9-14 所示。

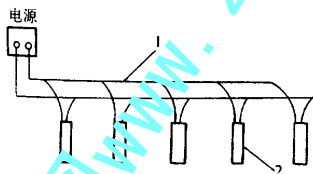


图 9-14 并联电爆网路

1—电线 2—电雷管

这种联接的优点是不因一个雷管断路而拒爆。其缺点是电爆网路总电流大 , 联接线消耗多 , 无法检查每个电雷管在网路中是否处于完好状态。

并联电爆网路计算方法如下 :

电爆网路总电阻  $R$  :

$$R = R_{\text{线}} + \frac{r}{m} \quad (9-4)$$

式中  $R$ ——总电阻  $\Omega$  ;

$m$ ——并联电雷管数；

其他符号代表意义同前。

电爆网路总电流  $I$ ：

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_{\text{线}} + \frac{r}{m}} \quad (9-5)$$

通过每个电雷管的电流  $i$  必须满足

$$i = \frac{I}{m} = \frac{U}{mR_{\text{线}} + r} \geq i_{\text{准}} \quad (9-6)$$

(3) 混合联网路计算 混合联是由串联和并联混合组成的一种联接方法。它又分串并联和并串联两类。

串并联是将若干个电雷管串联成组,再将若干串联组并联在一起,然后与电源联接,如图 9-15 所示。

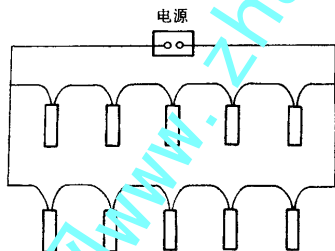


图 9-15 串并联电爆网路

并串联是先将若干个电雷管并联成组,再将各并联组串联在一起,然后与电源联接,如图 9-16 所示。

混合联的基本计算方法为：

网路总电阻  $R$ ：

$$R = \frac{nr}{m} + R_{\text{线}} \quad (9-7)$$



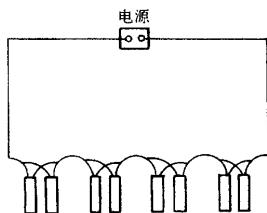


图 9-16 并串联电爆网路

网路总电流  $I$  :

$$I = \frac{U}{\frac{nr}{m} + R_{\text{线}}} \quad (9-8)$$

通过每个电雷管的电流  $i$

$$i = \frac{I}{m} = \frac{U}{nr + mR_{\text{线}}} \quad (9-9)$$

以上介绍的只是电爆网路联接的基本方法。简单串联或并联方法多用于规模较小的爆破中,混合联则多用于规模较大,炮孔(峒室)分布比较集中的爆破中。

## 二、导爆索起爆方法

导爆索起爆法,实际上是一种少雷管起爆法。在爆破作业中,从装药、堵塞、联线等施工程序上,都没有雷管,当一切准备就绪,实施爆破之前才接上起爆雷管,利用雷管引爆导爆索,然后由导爆索网路引起炸药爆炸。导爆索网路的联接有串联、分段并联和并簇联等形式。

### 1. 串联

将导爆索依次从各炮孔引出串联在一个网路上(图 9-17),起爆时,通过导爆索引爆各炮孔。它虽然施工简单,但导爆索用量太大且易因一个药包的导爆索有故障就可能产生大量瞎炮,实际中很少采用。

### 2. 分段并联

将各药包的导爆索从炮孔或药室中引出,分别联接在地面上事先铺好的导

爆索主线上。主导爆索起爆后,就能分别传递爆炸作用到各药包中去,而且时间几乎是相同的。这种联接方法起爆可靠性高,导爆索消耗少,是常用的一种方式,如图 9-18 所示。

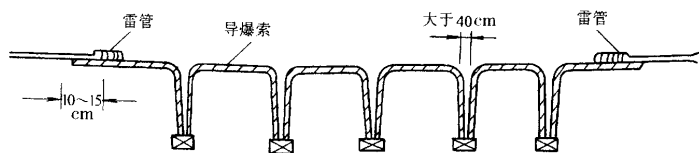


图 9-17 导爆索的串联起爆网路

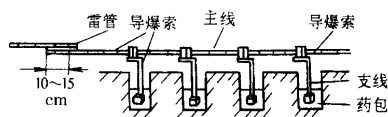


图 9-18 分段并联导爆索起爆网路

### 3. 并簇联接

将各药包引出的导爆索集中在一起,捆扎成簇,再和主导爆索相联接。这种方法消耗导爆索较多,仅适用于炮孔较集中的地方,如图 9-19 所示。

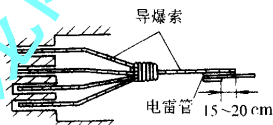


图 9-19 并簇联接导爆索起爆网路

### 4. 导爆索使用时应注意的几个主要问题

(1) 网路敷设时不要把导爆索折角、挽圈,并且不能有两根或两根以上互相交叉重叠。

(2) 搭接导爆索联接时,搭接长度不得少于 150mm,并要捆扎牢固。支索搭

接方向应和干索中爆轰波传播方向一致,其间的夹角不得小于  $90^{\circ}$ 。

### 三、爆破试验

水工建筑物岩石地基开挖施工组织设计,必须遵循各个时期的《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(以下简称《规范》)《规范》是根据国内水电工程一系列爆破试验研究成果和工程施工经验制定的,对促进开挖施工科技进步,保证岩石基础开挖工程的优质、高效和安全起了积极作用。但是各工程均有自身的特点,如地质、地形条件、岩石特性、建筑物基础轮廓形状及设计对某些部位的特殊要求等,都必须通过本工程的爆破试验确定开挖程序、爆破方式、爆破参数及相应的安全防护标准,才能在确保基础质量和周围重要设施安全的前提下,满足工程施工进度和施工强度的要求,降低施工成本。

水电工程爆破试验的内容,爆破破坏范围试验的观测方法,爆破地震效应的观测方法等内容在有关《规范》中已作了规定,本文不再重复。根据多个工程的经验,要在最短的时间和最小的空间取得有效的试验成果,必须注意下列事项。

#### (一) 制定切实可行的试验计划

现场试验爆破前需要清理场地,爆后需要及时将爆渣清出场外,这涉及挖掘、运输设备的供应;进行爆破需要钻机钻孔和所需的爆破器材;进行观测需要钻孔和水、电等。所以进行一次有成效的爆破试验,辅助工作量是很大的,费用也是很可观的,所以试验计划必须切实可行,尽可能做到一次试验完成多项内容,以最少的次数取得有用的数据,以节约试验费用。

大中型水利水电工程爆破试验内容总体上是相同的,但重点有差异,如有的工程是高边坡的稳定,有的斜坡轮廓面的平整,有的是寻求在底部有夹层情况下爆破对基础质量的影响,有的是为了制定重要设施的安全控制标准。所以制定试验计划时,必须围绕重点目标展开其他内容,切忌面面俱到。首先确定重点项目为达到试验目的需要进行的试验组数和场地面积,再考虑其他项目需要进行的试验组数,有哪些项目可以和重点项目结合或同时进行,不占或少占位置的,有哪些项目必须另占试验场地的。在试验场地面积大致确定后,再到现场勘察,尽可能选择有代表性的岩石露头和位置较集中(指一个或若干个位置不太分散的场地)的地点作试验场地。场地清理后(包括清除覆盖物,放小炮平整地面或

创造梯段临空面)根据地形规划试验区位置,并将试区范围及地形测绘到图纸上,再在图纸上详细布置每一项试验的位置。力求在确保重点项目的同时进行包含多个项目的综合性试验。考虑到地质变化和爆破中出现的意外因素,试区应留一个小区作补充试验。在试验计划落实后,再开始根据场地面积、形状、梯段高度等条件进行各项试验的施工详图设计。

## (二)增加必要的小型辅助试验,提高试验成果的合格率

为了保证试验计划的顺利进行,必须提高试验成果的合格率。为此,在正式试验开始前,可进行一系列小型辅助性试验。如结合试验场地清理或开辟通往试区的道路上进行爆破参数、单位耗药量探索试验;在试区外较窄的场地上进行预裂爆破试验。这些试验的目的是从宏观上初步求得较合理的参数,以保证正式试验爆破成功。又如在预裂爆破试验前,可进行一组单孔试验。主要探求既能使地面形成裂缝,又不致造成漏斗的孔口药卷埋置深度;观测裂缝的长宽与方向的关系;合理的线装药密度。官厅水库进行了14次单孔试验,结论是:进行孔径100mm、孔距80cm的预裂爆破时,应控制堵塞长度1.2m左右。预裂孔轴线顺岩层走向时,中段线装药密度可取 $380\text{g/m}$ 。垂直岩层走向时,线装药密度应适当加大。依据此数据进行的多孔预裂爆破一次成功。湖南东江电站进行了35次单孔试验,加深了对花岗岩地区预裂爆破规律的认识,为多孔预裂爆破参数选择提供了依据。单孔试验最大优点是避开了孔距的影响,突出了地质条件如岩层走向、地区主应力场方向的影响,对调整施工中不同方向的预裂爆破参数有指导作用。一次多孔预裂爆破试验比数次单孔试验要求的时间长,占地面积大,而且得到的结论是综合因素影响的结果,增加了资料分析的难度。所以正式试验前进行小型辅助试验,分析单个因素的影响,加深对单个影响因素规律的认识,对保证正式试验的成功是必要的。

## (三)精心制定试验实施方案

进行试验前,必须充分讨论,详细研究,精心制定试验实施方案。其内容包括:

(1)试验人员应明确分工。爆破试验一般分为设计及现场实施、监测和爆破器材性能试验三部分。应由专人负责,试验结束后分别提出专项报告。试验人员也大致分为三组,虽有明确分工但应共同参与。设计组也应按单项内容如预

裂爆破、保护层爆破等分项落实到人。每人对自己承担的项目应自始至终参加全过程,最后提交单项报告。

(2) 试验人员应跟踪试验全过程。为了保证试验计划顺利实施,试验人员应跟踪试验全过程。钻孔期间应检查孔位、孔深是否符合设计要求,并根据意外情况,如地质条件变化调整孔位,并绘到设计图上。爆破前要落实爆破器材的品种、规格和数量,落实堵塞材料、竹片、垫层材料等准备情况。爆破准备阶段应检查装药情况,如装药结构、装药长度、堵塞长度等。检查爆破网络是否按图施工,绑扎质量是否符合要求,网络地面雷管放置位置是否合适等。爆破后应注意观察挖掘爆渣的难易程度,有无拒爆现象,要提醒挖掘机操作人员不要破坏预裂或光爆壁面等。

只有跟踪试验全过程,才能获得真实、优良的试验成果,才能对下一步试验提出合理、有效的改进意见,保证最终达到试验的目的。

### 第三节 爆破的基本方法

工程爆破中常用的爆破方法有裸露爆破、深孔爆破、深孔爆破和洞室爆破等。在爆破作业中采用哪种爆破方法,应根据工程规模、施工条件和工程的具体要求进行选择。

#### 一、裸露爆破法

裸露爆破法也称面爆破法,是将药包直接放在被炸物的表面,依靠爆炸最初产生的气体压力进行爆破的一种方法。常用于炸除地面孤石、巨石,使其破碎或抛移。此法不需打炮眼,但耗药量较大,比一般打眼爆破多 2~3 倍。

表面爆破应在药包上覆盖湿土、黄泥等,覆盖厚度需大于药包高度。覆压物内不能夹有石块,以防石块飞抛造成危险。为了提高爆破效果,在破石时通常将药包置于大块石的凹槽或裂缝处;也可将药包底部做成集能穴;还可将硝铵炸药敷于岩石上 3~5cm 厚,这样可节省炸药 15%~20%。需抛移石块时,则将药包放于孤石飞向的后面(图 9-20)。

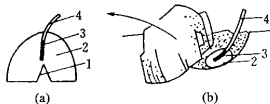


图 9-20 裸露爆破法

(a) 集能穴裸露药包 (b) 抛移孤石

1—集能穴 2—药包 3—雷管 4—导火索

裸露爆破要求的安全区范围较大,且一般不用于成组药包。对成组药包,为防止先爆药包将后爆药包抛散在异地爆炸造成事故,应采用电力、导爆索或非电起爆法同时起爆。

## 二、浅孔爆破法

浅孔爆破是指孔深小于 5m、孔径小于 75mm 的钻眼装药爆破。广泛用于基坑、隧洞、渠道及地下厂房开挖以及巨石的二次爆破和碎石的开采,但不适用于大规模的爆破工程。浅孔爆破的药包多为延长药包,成孔方法采用风钻机械或人工用锤、钢钎打孔。此方法操作简便,易于掌握。但单位岩石的钻孔工作量大,劳动生产率偏低。

浅孔法爆破用于建筑物的基础开挖、溢洪道开挖及采石场采集石料时,多采用阶梯开挖布置方式增加临空面,其炮孔布置参数如图 9-21 所示。

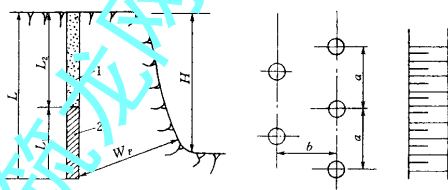


图 9-21 浅孔法阶梯开挖布置

1—堵塞物 2—药包;

$L_1$ —装药深度;  $L_2$ —堵塞深度;  $L$ —炮孔深度

炮孔布置时须注意下列原则。

(1) 炮孔方向不要与最小抵抗线方向重合,以免产生冲天炮,降低爆破效果。

(2) 充分利用地形 , 尽量利用和创造临空面以减小爆破阻力。

(3) 炮孔应尽量垂直于岩石的层面、节理和裂缝 , 且不要穿过较宽的裂缝以免漏气。

炮孔布置的主要技术参数为 :

(1) 炮孔深度  $L$  :

在坚硬岩石中  $L=(1.1\sim1.15)H$  (9-10)

在中等坚硬岩石中  $L=H$  (9-11)

在松软岩石中  $L=(0.85\sim0.95)H$  (9-12)

式中  $H$ ——阶梯的高度。

(2) 计算抵抗线长度  $W_p$  :

抵抗线指由药包底部至地面的最小距离 , 也可称为底盘抵抗线 , 其取值为

$$W_p=(0.6\sim0.8)H \quad (9-13)$$

(3) 炮孔间距  $a$  :

炮孔间距应使某一炮孔爆炸时不致炸伤相邻的另一炮孔 , 且爆后两孔间不留残石埂。

用火雷管起爆时  $a=(1.0\sim1.5)W_p$  (9-14)

用电雷管起爆时  $a=(1.2\sim2.0)W_p$  (9-15)

(4) 炮孔排距  $b$  :

$$b=(0.8\sim1.2)W_p \quad (9-16)$$

当布置多排炮孔时 , 前后排炮孔应交错布置成梅花形 , 并依次爆破。

浅孔一般用于松动爆破 , 其药包重量可用基本公式  $Q=0.33KV$  或取表 2-5 中  $K'$  套用基本公式  $Q=K'V$  计算 , 也可按  $Q=0.33KabH$  或  $Q=K'abH$  来计算药包的重量。

爆破装药一般使用药卷 , 也可用散装药。装药长度为  $1/3\sim1/2L$ 。装药后应用炮泥堵塞 , 堵塞长度为  $0.2\sim0.5L$ 。

### 三、深孔爆破法

深孔爆破是和浅孔爆破相对而言的 , 其中最常用的是深孔梯段爆破。



深孔梯段爆破是我国水电站坝基开挖的主要爆破方法。常规深孔梯段爆破以毫秒爆破为主,常用的爆破方式有:齐发爆破、微差爆破、微差顺序爆破、小抵抗线宽孔距爆破、微差挤压爆破等。

## (一)深孔梯段爆破方法

### 1. 齐发爆破

齐发爆破是一种同排孔由导爆索串联,排间用不同段毫秒雷管引爆的爆破方法。这种爆破方法施工简单不易发生错误,但炮孔内的导爆索自上而下传爆,易成泄出通道,减少气体在孔内作用的时间,不利于破岩作用,近几年使用逐渐减少。

### 2. 微差爆破

微差爆破是不同排用不同段毫秒雷管调节排间的差时间,同排同段雷管以其自身误差达到微差时间的爆破方法。常用于孔、排数较少情况下的爆破。

### 3. 微差顺序爆破

微差顺序爆破是采用塑料导爆管雷管组成接力起爆网络,进行逐孔按规定顺序起爆的爆破方法。如果每个炮孔内再分段,可组成孔间、孔内微差顺序爆破,这是目前世界上最先进的起爆方法。该方法在每一孔爆破时均有三个自由面,故能使岩石得到充分破碎。在坝基开挖以及许多重要建筑物附近或炮孔很多的情况下,这一方法显示出它的优越性。它将取代前面两种爆破方法,成为水电工程主要采用的起爆方法。

### 4. 小抵抗线宽孔距爆破

在一个钻孔所能担负面积条件下,间排距乘积等于该面积者有多种组合,其中小抵抗线与宽孔距的组合较之孔距是抵抗线的1~2倍的任何组合所获得的效果要好。该爆破方法孔距是抵抗线的2~8倍时称为小抵抗线宽孔距爆破。我国采用2~4倍者居多,因其爆破的岩块均匀、大块率低,而受到欢迎,并在坝基开挖中逐渐被采用。对于块度要求在某一小范围的采石爆破,此法更为有效。

### 5. 微差挤压爆破

在台阶正面未清完爆渣条件下进行的爆破称为挤压爆破。挤压爆破加快施工进度和增加块石破碎度有利,但也有以下不利点:

(1)台阶前沿留底坎,会使后续爆破不能爆破到要求高程,造成根底爬高现象;

(2)会产生台阶后部严重拉裂 ,更坏者会出现后翻和硬墙 ,给后续台阶钻孔造成困难 ;

(3)爆破单耗高 ,振动大 ,爆堆高。

我国水电建设中 ,此法多用在采石场爆破 ,在坝基开挖中较少使用。由于压渣的存在 ,台阶爆破时的装药量应适当增加 ,一般比正常梯段爆破装药量增加 10%~30%。压渣长度(沿抵抗线方向)超过 10m 后 ,影响程度再增加的可能性减小。此外 ,挤压爆破时 ,在排间微差时间比正常梯段爆破适当延长 ,以便为后排爆破留出必要的空间。依据经验在常规爆破(最小抵抗线在 4m 以内)条件下 ,间隔时间宜选在 50~100ms。

(二)深孔梯段爆破参数

深孔梯段爆破的钻孔直径 ,SL47-94 规范规定 ,主体工程部位 ,直径不应超过 110mm ,钻孔角度有垂直和倾斜两种。垂直孔施工方便 ,但效果不及斜孔好。常用的垂直孔参数使用范围见表 9-2。

表 9-2 常用垂直孔爆破参数使用范围

爆破分类	孔径 (mm)	梯段 高度 (m)	底盘 抵抗线 (m)	排距 (m)	间距 (m)	孔深 (m)	超钻 (m)	堵塞 长度 (m)	装药 直径 (mm)	炸药 单位 耗药量 (kg/m <sup>3</sup> )	备注
梯段爆 破主炮孔	80	8	3	2.0	2.5	8.5	0.5	2.0	70	0.35	此栏对应垂直 孔。斜孔在此基础 上调整
	~ 100	~ 12	~ 5	~ 3.5	~ 6.0	~ 13.0	~ 1.0	~ 3.0	~ 80	~ 0.8	
梯段爆 破缓冲孔	80	8	1.5	1.5	1.5	8.5	0.5	1.0	0.32	0.3	多用于边坡或开 挖边界附近 ,起着 保护保留岩体或预 裂面的作用
	~ 100	~ 12	~ 2.5	~ 2.5	~ 2.5	~ 13.0	~ 1.0	~ 2.0	~ 0.7	~ 0.7	

(三)深孔梯段爆破的装药结构

深孔梯段爆破的装药结构有 :耦合连续装药、耦合间隔装药、不耦合连续装药、不耦合间隔装药以及混合装药等方式。

在接近建基面、开挖边坡部位多用不耦合装药。因为不耦合装药可以缓解炸药对炮孔底及周壁岩石的破坏。其他部位可采用增加单孔装药量 ,减少钻孔量的耦合装药方式。炮孔底部耦合装药 ,中部以上或上部采用不耦合装药也是较常用的方法。炮孔底部耦合装药 ,可使底板爆得比较干净且不留根底 ,这在梯段爆破中至关重要。

是否采用间隔装药 ,由以下两种情况决定 :首先 ,利用它作为调整块度级配的手段 ;其次 ,连续装药在孔口的堵塞长度过长时 ,必须用间隔装药。

(四)梯段爆破参数实例

三峡永久船闸二期工程闸室开挖是三峡工程最重要的开挖部位之一。为保护闸室边墙及保留岩体质量 ,留有 3~5m 的保护层 ,采用手风钻钻孔爆破 ,保护层外侧增加施工光爆面和缓冲层 ,这是双保险的施工方法 ,如图 9-22 所示。

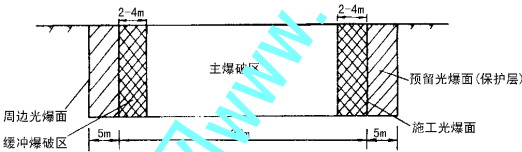


图 9-22 三峡工程永久船闸二期工程闸室开挖示意图

表 9-3 为东风水电站爆破试验的参数 ,坝基及部分坝肩开挖基本使用表中孔间微差顺序爆破的参数值 ,缓冲孔的间排距为 1.5~2.0m ,单耗 3.0~0.5kg/m<sup>3</sup>。

表 9-3 东风水电站爆破参数表

参 数	排间齐发爆破	孔间微差顺序爆破	孔间、孔内微差顺序爆破
梯段高度( m )	11.3	11~13	13.5
斜孔角度( ° )	75	75	75
孔深( m )	12.2~13.6	12~15.1	11~14.7
孔距( m )	2.5~3.0	3.0	3.0
排距( m )	2.5~2.7	2.5~2.8	2.5~2.8
超钻( m )	0.8	0.6~0.8	1.0
堵塞长度( m )	1.6~2.5	1.6~2.0	2.0
爆破面积( m <sup>2</sup> )	16×15	17×18~15.5×20	11×24
炮孔排数( 排 )	5	5	4
炮孔数目( 孔 )	31	35~40	36
总装药量( kg )	1113.3	1459.8~1802.5	1452
爆破方量( m <sup>3</sup> )	2450	3555~3659	2935
设计单耗( kg/m <sup>3</sup> )	0.5	0.5	0.55
实际单耗( kg/m <sup>3</sup> )	0.45	0.42~0.49	0.50
爆破高度与梯段 高度之比 $h/H$	0.95	0.92~0.96	0.71
爆堆长度与宽度之比 $L/B$	1.64	1.4~1.78	1.45
大块率( 4m <sup>3</sup> 电铲 ) ( % )	6.6	0.26~0.5	0.69
大块率( H <sub>55</sub> 油铲 ) ( % )	3.3	0.17~0.44	0.58

注 使用的乳化炸药威力只相当 2 号岩石硝铵炸药的 0.8~0.9 倍。

主爆孔、缓冲孔与光爆孔典型装药结构如图 9-23 所示。

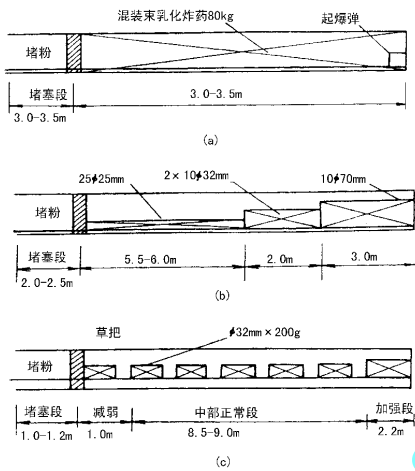


图 9-23 施工深孔装药结构图

(a)主爆孔装药结构图 (b)缓冲孔装药结构图；  
(c)光爆孔装药结构图

## 四、洞室爆破法

洞室爆破(药室爆破法)的实质,就是将大量炸药装入预先挖掘的洞室中进行爆破。由于一次爆破药量可以高达几百吨甚至几千吨,因此也叫“大量爆破”。

### (一)洞室爆破的特点及其分类

#### 1. 洞室爆破的特点

一次爆破的方量很大,尤其是在土石方数量集中的工点,从导洞、洞室开挖到装药爆破,能在较短期内完成,可缩短工期。但是开挖装药的洞室比较困难,劳动强度高,工作条件差,爆后的岩块不均匀,产生大块率较高,二次解小工作量比较大,引起较大的震动对建筑物保护不利,通风条件也差。

#### 2. 洞室爆破的分类

按其目的性质可分为定向爆破、抛掷爆破、扬弃爆破、松动和崩塌爆破等四类。定向爆破、抛掷爆破、扬弃爆破是与松动爆破和崩塌爆破不同的,它不仅能

将岩体破碎 ,而且还能将岩体抛掷至预定地点或扬弃到开挖边界以外。松动和崩塌爆破则需采用挖掘、装载机械 ,通过运输工具将爆落的岩块运至目的地。由于洞室爆破种类较多 ,本节仅讲述松动爆破和抛掷爆破方法的应用。

## (二)药室布置

### 1. 松动爆破的药室布置

药室松动爆破在露天开采时 ,按其爆破规模的大小可分为大洞室松动爆破和小洞室松动爆破。大洞室应用在高度大于 7m 的梯段或山体上 ,小洞室用在梯段高度不大于 4~7m、机械化程度低的中小露天工程。它们的主要区别在于小洞室通往药室的导洞小、装药量少因而爆破规模也小,但它们的药包布置原则 ,爆破参数的选择和装填技术操作基本相同。因此 ,对于小洞室或大洞室松动爆破 ,统称为药室爆破法(图 9-24)。

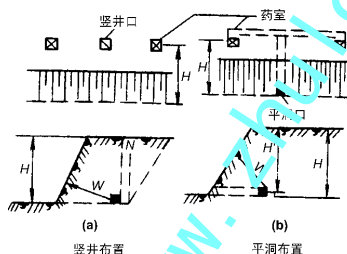


图 9-24 药室爆破法的药包布置图

通往药室的导洞可用竖井(图 9-24a)或平洞(图 9-24b)。而药包作用主要方向应朝向临空面或斜坡地面的方向 ,不要使爆破作用方向朝向上方。因此药包布置的最小抵抗线 W 方向应指向临空面的水平方向。

在进行松动药包布置时 ,应考虑爆破后爆堆比较平缓 ,岩块比较均匀 ,尽量降低爆堆高度(一般不超过 15m)和减少大块率(通常不超过 5%~15%)。并且 ,根据不同地形和地质条件采取不同的药包布置方式。

对于地形坡度较缓 ,高差较小 ,而最小抵抗线 W 与药包中心至地表垂直高度之比  $\frac{W}{H} = 0.6 \sim 0.8$  时 ,药包可按单层布置 ;当山体陡而高时 ,药包应布置成双层 ,如图 9-25。

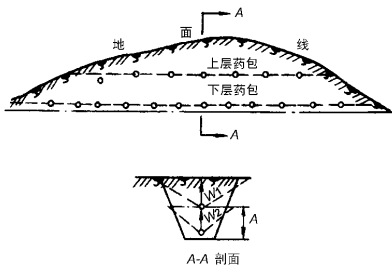


图 9-25 松动爆破分层药包布置图

在地质条件比较复杂的爆区 ,应充分考虑地质条件对爆破效率的影响。

## 2. 抛掷爆破的药室布置

抛掷爆破多用于半挖半填的开挖工程。在地面坡度大于  $30^\circ$  的地形 ,它只能将土石方向惟一的方向抛掷出去。斜坡地面的爆破效果比平坦地形好得多。尤其是地面坡度越陡 ,爆破范围越大 ,抛掷方量也越多。因此 ,一般斜坡地面的爆破多用单层单排药包布置。

如果爆破开挖基底较宽 ,如水工建筑物的泄洪道、消力池等 ,在药包布置时 ,可以用单排大药包布置形式 ,也可以布置多排药包 ,如图 9-26 所示。单排大药包抛掷方量大 ,炸药消耗多 ,对山体破坏范围大 ,特别是高边坡以上地面较远距离内可能出现大量的环向裂缝 ,增加清方刷坡的工程量。多排药包布置情况与此相反。在设计时 ,应作好经济比较 ,再选用合理的技术方案。



图 9-26 斜坡地面多排药包布置示意图

如果在斜坡地面以下为深挖方如开挖渠道 ,一般采用双层或多层药包布置 ,如图 9-27 所示。



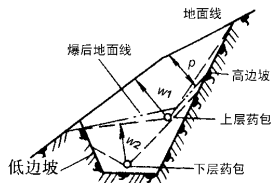


图 9-27 多层药包延期爆破示意图

### (三) 爆破参数选择

药包(药室)布置参数主要是指最小抵抗线  $W$ 、爆破作用指数  $n$  及药包间距  $a$  等。

#### 1. 最小抵抗线 $W$ 的确定

确定药包的最小抵抗线,应考虑以下因素:

(1) 主导爆破方向和抛掷方向的要求。药包在不同方向上抵抗线的大小直接影响其爆破作用、破碎效果及抛掷方向。因而,首先要考虑最小抵抗线的方向,使其满足爆破的要求。

(2) 炸落方量、抛掷方量及堆积的要求。此外,还应考虑施工安全、方便及工程量的大小。

(3) 保护边坡不受破坏。在确定靠边坡的药包位置时应留保护层,如图 9-28 所示。保护层的厚度为:

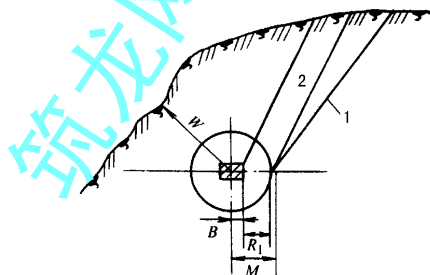


图 9-28 边坡保护层

1—边坡线 2—保护层

$$M = R_1 + 1.7B$$

(9-17)

式中  $M$ ——药包中心到边坡的水平距离  $m$ ;

$R_1$ ——药包的压缩圈半径  $m$ ;

$B$ ——药包宽度之半  $m$ 。

(4) 满足某些条件下的特殊要求。例如 遇有大断层、溶洞或破碎带时 药包应尽量避免 ,也可设置辅助药包加以处理。

## 2. 爆破作用指数 $n$ 值的确定

爆破作用指数  $n$  值 ,是抛掷或扬弃爆破中的主要参数之一 ,它不仅关系到爆破破坏范围的大小 ,而且关系到抛掷方量的多少 ,抛掷距离的远近等。应根据地形条件和不同的爆破目的与要求 ,选取适宜的  $n$  值。

### (1) 斜坡地面的抛掷爆破。

多临空面地形抛掷爆破时

$$n = 1.0 \sim 1.25$$

陡壁地形抛掷爆破时

$$n = 0.8 \sim 1.0$$

在斜坡地面单侧抛掷爆破时 ,如抛掷率为 60% ,可按地形自然坡角  $\theta$  参考表 9-4 选取  $n$  值。

表 9-4 不同地形  $n$  值的参考值

地 形 坡 度 $\theta$	$n$ 值
$15^\circ \sim 30^\circ$	2.00 ~ 1.75
$30^\circ \sim 45^\circ$	1.75 ~ 1.50
$45^\circ \sim 60^\circ$	1.50 ~ 1.25
$60^\circ \sim 70^\circ$	1.25 ~ 1.00

(2) 松动爆破。

多面临空形加强松动爆破： $n = 0.7 \sim 0.8$

陡壁地形加强松动爆破： $n = 0.65 \sim 0.75$

### 3. 药包(药室)间距 $a$ 值的确定

药包间距直接影响爆破质量、爆破成本及工程量的大小。合理的药包间距能保证爆破时既在两药包之间不留岩埂,又能充分利用炸药能量。

药包间距的大小,与爆破类型、地形和地质条件等因素有关。一般情况下药包间距计算公式如下。

(1) 松动爆破。

平坦地区渠槽爆破

$$a = (0.8 \sim 1.0)W$$

斜坡或阶梯地段爆破

$$a = (1.0 \sim 1.2)W$$

(2) 斜坡地面的抛掷爆破。

斜坡地面的抛掷爆破,地形有利,清方比较容易。通常要求爆破后平顺平整,无残留岩埂,并能有效地提高抛掷方量,减少导洞药室的开挖工程量。其药包间距公式为

坚硬岩石

$$a = W^3 \sqrt{f(n)}$$

次坚石或软石

$$a = nW$$

斜坡地面同时起爆的上下层两药包中心间距  $a$  为：

$$a \leq 0.9W \sqrt{1+n^2}$$

(四) 装药量计算

集中药包的洞室爆破,装药量计算视不同爆破类型而定。

#### 1. 松动爆破装药量计算

在平坦地面松动爆破时 ,通常采用松动爆破公式 :



$$Q=0.44qW^3$$

在多面临空和陡崖的崩塌爆破时 ,常用减弱松动爆破公式 :

$$Q=(0.125\sim0.44)qW^3$$

在比较完整的岩石 ,常用加强松动爆破公式 :

$$Q=(0.44\sim1.00)qW^3$$

2. 抛掷爆破装药量计算

在斜坡地面 地面坡度大于 30°时 ,常用计算公式为 :

$$Q=qW^3\frac{f(n)}{f(\alpha)}$$

- 以上各式中     $Q$ ——装药量 kg ;  
                   $f(n)$ ——爆破作用指数函数 ;  
                   $q$ ——单位炸药消耗量 ,kg/m<sup>3</sup> ;  
                   $f(\alpha)$ ——斜坡地面爆破漏斗体积增量函数 ;  
                   $f(n) \vee f(\alpha)$ ——查表 9-5 ;  
                   $W$ ——最小抵抗线。

表 9-5     $f(\alpha)$  及  $f(n) \vee f(\alpha)$  值

地面 坡度 (°)	$f(\alpha)$ 坚	不同 $n$ 值的 $f(n) \vee f(\alpha)$					$f(\alpha)$	不同 $n$ 值的 $f(n) \vee f(\alpha)$				
		1.00	1.25	1.50	1.75	2.00		1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
0	1.0	1.00	1.57	2.43	3.62	5.20	1.0	1.0	1.57	2.43	3.62	5.20
15	1.01	0.99	1.55	2.10	3.60	5.15	1.02	0.98	1.54	2.38	3.55	5.10
30	1.10	0.91	1.43	2.21	3.28	4.83	1.26	0.78	1.25	1.93	2.88	4.14
45	1.28	0.78	1.22	1.90	2.82	4.06	1.58	0.63	0.99	1.54	2.30	3.30

## 第四节 边线控制爆破施工技术

边线是指开挖区和保留区界面的分界线。边线控制爆破是为保护保留区岩体或围岩表面的特殊爆破法。炸药在炮孔内爆炸时,产生强大的冲击波和高压气体并猛烈击炮孔周围的岩体,使其破碎或开裂。当在有限的轮廓范围内进行开挖爆破时,一方面要求爆破开挖的边界尽量与设计的轮廓相符合,不要出现超挖和欠挖,同时也要求开挖边界上保留的岩体尽量保持完整无损。光面爆破和预裂爆破就是为了达到上述目标而采用的一种爆破技术。光面爆破多用于隧洞开挖,而预裂爆破则多用于高边坡开挖和控制设计边线的深槽基础开挖。

### 一、光面爆破技术措施

光面爆破实际上就是对光爆层的爆破,所谓光爆层,是指开挖轮廓线上的周边孔与最外层主爆孔之间的一圈岩石层。在隧道施工中采用光面爆破具有以下优点:

(1) 光面爆破对围岩的破坏很轻微,可提高围岩的稳定性,减少了临时支护的工作量。

(2) 光面爆破可以基本解决隧道的超、欠挖问题,提高施工质量,加快施工进度,并节省混凝土衬砌浇筑量。

(3) 采用光面爆破,使岩的壁面平整,危石少,撬顶工作简单,减轻了表面应力集中现象,避免局部冒落,增强了围岩的稳定和施工安全,并为锚喷支护的应用创造了条件。其具体做法是沿设计开挖边线布置小孔径密间距的周边炮孔,采用不偶合装药结构,进行少量炸药的弱松动爆破来炸除预留光爆层。由于孔距较小而且是同时起爆(电雷管起爆),相邻周边炮孔的爆轰压应力交汇后,形成垂直于周边线的拉应力 $\sigma_p$ (图9-29),使得周边线产生平整的拉断裂缝,在爆炸气体急剧膨胀做功的作用下,将已被破坏的光爆层炸除并在边界面上留下半圆形的炮孔残痕。

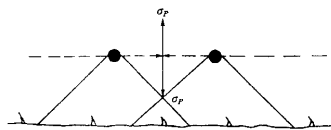


图 9-29 周边孔成缝示意图

光面爆破施工的主要技术措施有：

### 1. 周边炮孔的间距和最小抵抗线

在采用预留光爆层的光面爆破作业中,周边炮孔的直径宜在 50mm 以下,炮孔的间距一般为 10~16 倍的炮孔直径,即 500mm~800mm。最小抵抗线长度应根据岩石的特点、炮孔间距等确定,一般为炮孔间距的 1.2~1.4 倍。

### 2. 周边炮孔装药量

周边炮孔的装药量比一般爆破装药量少 1/2 左右,当孔深在 2m 左右且使用 2# 岩石铵梯炸药时,一般不宜超过以下值:

松软岩 ( $f=2\sim4$ ), 100~150g/m;

中硬岩 ( $f=6\sim8$ ), 150~200g/m;

坚硬岩 ( $f=10\sim12$ ), 200~250g/m。

### 3. 周边炮孔装药结构

周边炮孔装药应使炸药均匀地分布在炮孔内,并与炮眼孔壁有一定的空隙(即不偶合装药),不偶合系数一般应大于 2,最少也不能小于 1.5,以便减弱炸药爆炸时对孔壁的爆轰破坏作用。

装药时,一般宜用直径为 25mm 的小直径药卷连续装药;当所用药卷直径为 35mm 的普通药卷时,可采用空底装药结构(图 9-30)、间隔装药结构(图 9-31)或采用双毫秒电雷管分段空气柱装药结构(图 9-32)。

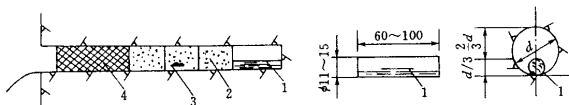


图 9-30 空底木棍炮装药结构

1—木棍 2—药包 3—雷管 4—炮泥

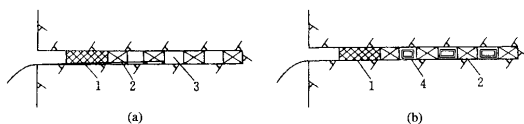


图 9-31 间隔装药结构

(a) 空气间隔装药 (b) 竹筒间隔装药

1—炮泥 2—药包 3—空气 4—竹筒

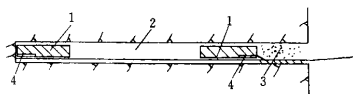


图 9-32 单段空气柱装药结构

1—药卷 2—单段气柱；

3—堵塞物 4—电雷管

#### 4. 起爆顺序及周边孔起爆时差

隧洞开挖的起爆顺序为先掏槽炮孔起爆,再崩落炮孔起爆,最后是周边炮孔起爆。周边炮孔的起爆时差应越小越好,岩时差超过  $0.1s$  时,就和单孔爆破一样,难以取得理想的光面爆破效果。因此,周边孔最好使用导爆索(又称传爆线)或即发电雷管同时起爆。

## 二、预裂爆破技术措施

预裂爆破是开挖岩石的方法之一。岩石开挖是利用炸药的爆炸力,把要开挖的部分爆碎运走。这种爆炸力经常又会使相邻近的岩体或建筑物同时受到破坏。在大规模爆破中,特别是用潜孔钻钻孔放炮的条件下,即使采用梯段爆破,限制一响起爆药量等措施,破坏区的范围仍然很大。例如:在中等裂隙发育的岩体中,当药包直径  $80mm$  时,它的相应表面破坏范围的长度  $L$  约为  $5 \sim 8m$ 。在裂隙发育的或有薄弱夹层的岩体中,破坏范围还要大一些。

过去为了保护上述部位的岩体完整,多采取预留保护层或设防震孔的措施。虽有减震作用,但往往还不能制止裂缝伸入保留区,因此防护效果并不好。



所谓预裂爆破 ,就是沿设计开挖轮廓线上按一定距离 ,预钻一排钻孔 ,孔内装入特制的爆药包 ,在开挖区未爆破前 ,先行起爆。爆炸后沿孔轴面方向形成一条有一定宽度的贯穿裂缝 ,把开挖区和保留区岩体分开。在它的“屏蔽”下 ,开挖区爆破时 ,能保证被保留岩体不受到破坏或尽可能小的受体振动。

### (一)预裂爆破的基本原理

所谓预裂爆破原理 ,主要指预裂爆破成缝的机理。为保证预裂爆破成功 ,首要的条件是不压坏预裂孔壁 ,其次是沿预裂孔连线的方向成缝。当炸药爆炸后 ,产生的冲击压力和高压气体的作用 ,将会使孔壁产生剧烈破坏。要想不压坏孔壁必须采用不偶合装药法 ,即药包直径  $d'$  小于钻孔直径  $D$  ,如图 9-33 所示。试验发现 ,当药包与孔壁之间存在空气间隙时 ,由于空气的缓冲作用 ,使孔壁所受压力大大地降低。经试验得出 ,当不偶合系数  $m=2.5$  时 ,作用在炮孔内壁的最大切向应力只相当于不偶合系数为 1.1 时的大约  $1/16$ 。因此 ,完全有可能利用现有的常用炸药 ,用不偶合装药来降低孔壁压力。把几万个大气压降到每平方厘米只有几千或几百公斤的压力值。当降低的压力值小于或极接近于岩石的极限抗压强度时 ,便可使孔壁不受爆破压缩破坏或者只受少量的振动。

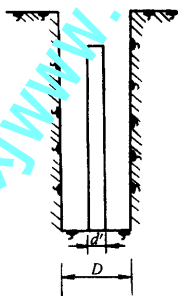


图 9-33

在利用不偶合装药保证孔壁不受破坏的前提下 ,第二个条件就是怎样保证在预定的方向成缝。根据实践经验 ,只需要调整相邻炮孔的距离或孔内装药量便可达到成缝的目的。多数研究工作者采用爆炸应力波与高压气体联合作用理论 ,解释预裂缝的形成过程。

## (二) 预裂爆破主要参数的确定

为了使预裂爆破达到良好的效果,需要正确地选定预裂爆破的参数。由于影响预裂爆破参数的因素很多,如装药密度、钻孔间距、地质条件、炸药性能、药包结构以及不偶合系数等等。这些因素之间的关系又很复杂,要想建立比较接近实际的参数计算式是很困难的。因此在目前只有通过现场爆破试验,才有可能选定比较接近工程实际的参数。一般情况下,可以依靠经验公式结合工程实际情况来确定主要的爆破参数。

### 1. 预裂爆破要求的质量标准

预裂爆破的目的是使开挖轮廓面岩体不受破坏,保持较整齐的设计轮廓面,这就需要在预裂爆破时把岩体切开造成整齐的贯通裂缝。另一方面还要求在预裂爆破时也不造成大的爆破裂隙。为达到上述目的,预裂爆破应达到以下的质量标准。

(1) 岩体在预裂面上形成贯通裂缝,其表面宽度不小于 1cm;

(2) 预裂缝面保持平整,不平整度小于 15cm;

(3) 预裂缝面岩体不产生大的爆破裂隙。

为达到上述三项要求,需要合理处理装药密度、不偶合系数和钻孔间距三者的关系。

### 2. 装药密度的计算公式。

(1) 经验公式。

根据试验成果和有关资料,长江水利科学院等单位建立了如下经验公式:

$$\Delta_{\text{线}} = 0.36 [R_{\text{压}}]^{0.63} \cdot \alpha^{0.67} \quad (9-18)$$

式中  $\Delta_{\text{线}}$ ——线装药密度, g/m, 系全孔装药量(扣除底部增加药量)除以装药段长度;

$\alpha$ ——钻孔间距, cm;

$[R_{\text{压}}]$ ——岩石极限抗压强度, MPa。

(2) 《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》SDJ211-83 介绍的公式。

$$\Delta_{\text{线}} = 0.188 \cdot \alpha [R_{\text{压}}]^{0.5} \quad (9-19)$$

式中  $\Delta_{\text{线}}$ ——线装药密度, g/m, 以全孔长度计。

上述装药密度经验公式系采用 40 % 的硝化甘油耐冻胶质炸药所得出的 , 若用其他炸药时 , 需进行换算。

### 3. 钻孔间距 $a$ 的确定

实践经验表明 , 钻孔间距和钻孔直径之间有一个合理的关系。钻孔间距  $a$  和钻孔直径  $D$  之比值 , 称为间距系数 , 用  $E$  表示。  $E$  值是一个重要的指标。它的大小决定钻孔的数量。一般认为以 7~12 为宜 , 即  $a = (7 \sim 12) D$

当孔径小时取大值 , 孔径大时取小值。当岩石均匀完整时 , 取大值 , 岩石破碎时取小值。

### 4. 不偶合系数 $m$ 的确定

钻孔装药的不偶合程度 , 用  $m = D/d$  表示。根据爆破的实践经验 , 一般不偶合系数选用  $m = 2 \sim 4$ 。坚硬岩石选小值 , 松软岩石选大值。

除经验公式外 , 还可采用其他方法初步拟定上述参数。但不论何种方法 , 所得数据都是一个初步值 , 必须通过现场试验进一步调整后 , 才能作为正式爆破的依据 , 在实践过程中还需要逐步修改。

## (三) 初选预裂爆破参数和设计装药结构

初选预裂爆破参数的方法有三种 : ①理论公式计算法 ; ②经验公式计算法 ; ③相似工程地质类比法。许多工程实践证明 , 三种方法都是可行的。其中 , 经验公式法最简单 , 成为工程上最常用的方法。

### 1. 线装药密度 $q$

20 世纪 70 年代葛洲坝等工程进行大规模预裂爆破施工并获得成功后 , 预裂爆破技术已在我国大中型水利水电工程中广泛应用 , 积累了丰富的经验。许多爆破工作者根据自身的实践和搜集的资料推导出计算线装药密度的各种经验公式 , 其中应用最普及的是长江科学院推荐的经验公式。它归纳了葛洲坝工程预裂爆破试验和施工中的大量数据 , 又经过国内不同地质条件下的预裂爆破实践 , 修正后得到 :

$$q = 0.034 [ \sigma_{\text{压}} ]^{0.63} [ a ]^{0.67}$$

式中  $q$ ——线装药密度 , kg/m ;

$[ \sigma_{\text{压}} ]$ ——岩石抗压强度 , MPa ;

$a$ ——孔距 , m。

## 2. 钻孔直径 $D$

随着钻孔深度增加,装药难度也相应增大,所以钻孔直径应根据钻孔深度确定,但需满足不耦合系数  $2\sim 4$  的要求。一般情况可参照下列参数确定:

孔深 (m)	孔径 (mm)
$< 3$	40~60
3~10	60~80
10~15	80~100
$> 15$	100

## 3. 孔距

钻孔间距应根据部位的重要性,预裂缝形成的难易程度和孔径大小来确定。一般  $a = (7\sim 12)D$ ,  $D$  大取小值,  $D$  小取大值,重要部位取小值。也可参照下列参数确定:

孔径 (mm)	孔距 (cm)
40	40~60
60	60~80
80	80~100
100	80~120

## 4. 装药结构设计

合理的装药结构应满足下列要求:从孔口到孔底线装药密度的变化应与岩性的变化相适应;导爆索上的药卷应均匀分布,药卷间的中心距离不大于 50cm。设计的线装药密度  $q$  可作为中段装药密度  $q_{\text{中}}$ 。在岩性均匀部位,装药结构分成三段:

(1) 孔口段。根据地面岩石风化程度确定线装药密度。一般  $q_{\text{孔口}} = (1/2 \sim 1/3)q_{\text{中}}$ ,装药长度  $1\sim 2\text{m}$ 。在地面岩石坚硬完整部位,  $q_{\text{孔口}} = q_{\text{中}}$ 。

(2) 中间段。预裂爆破的主要装药段,对预裂缝的形成和预裂缝的宽度起控制作用,  $q_{\text{中}} = q$ 。

(3) 孔底段。底部装药量随着孔深增加而加大,集中分布在孔底  $1\sim 2\text{m}$  范围内,以克服岩体底部对预裂缝面的夹制力。底部线装药密度可参照下列数据:

孔深 $L$ (m)	底部线装药密度 $q_{\text{底}}$
$< 10$	$(1\sim 2)q_{\text{中}}$

10~15

$(2\sim3)q_{\text{中}}$

15~20

$(3\sim4)q_{\text{中}}$



当孔深超过 20m 时 ,可根据地质等条件酌情处理。

#### (四)调整预裂爆破参数和装药结构

预裂爆破和其他任何事物一样 ,有它内在的规律性。只有通过大量的施工实践 ,才能较深刻地认识和掌握它。当预裂爆破效果不理想时 ,首先检查施工实施的预裂爆破参数和初选的参数是否一致 ,施工工艺是否合格 ,在验证这两点基本符合要求后 ,再进行对照检查。

##### 1. 爆后地面炮孔间未出现裂缝

在岩层近水平状、多层面、多软弱夹层易形成预裂缝的地区 ,当爆后地面预裂孔间未出现预裂缝时 ,应进行宏观调查 ,若与预裂孔轴线平行的天然裂隙在较大的范围内张开(指一条或数条裂隙连接长度和预裂孔轴线长度相近) ,有可能在表层层面以下 ,岩体沿预裂孔轴线裂开。此时应将孔口段药量均匀分散 ,并适当提高顶部药卷位置 ,以利于地面形成预裂缝。

若无平行预裂孔轴线的裂隙 ,可能是全孔线装药密度偏小。其原因可能是 :

(1)局部地段岩性变化。对岩体强度估计偏低 ,如葛洲坝二江厂房预裂爆破线装药密度按砂岩抗压强度 20MPa 设计 ,爆破效果良好。但在 6 号机组地段 ,爆破能量全部冲击孔外 ,地面岩石无任何裂缝。后经二次增加药量重复爆破 ,才形成宽 0.5~1.0cm 的预裂缝 ,开挖后才发现 6 号机组段为钙质砂岩 ,其抗压强度 50MPa ,为砂岩的 2.5 倍。

(2)与岩层走向有关。一般垂直岩层走向的预裂缝较平行岩层走向的预裂缝难形成。官厅水库预裂爆破实践表明 ,为获得同样的爆破效果 ,前者与后者相比 ,线装药密度应增加 10%~20%。

(3)与地质最新地应力场的主应力方向有关。预裂缝轴线垂直于主应力方向时 ,裂缝较难形成 ,因为在垂直于炮孔轴线 ,有与爆炸拉应力方向相反的作用力 ,阻止预裂缝面张开 ,反之 ,平行于主应力方向的预裂缝较易形成。葛洲坝大江厂房进行了近百次预裂爆破 ,都符合这个特点。其中 ,有两次典型实例 ,分别为同一高程、同一部位、同一岩性和同一时间进行的预裂爆破 ,两条预裂孔轴线呈“Γ”形。在砾岩地段 ,轴线垂直于主应力方向的预裂炮孔间未形成裂缝 ,轴线

平行于主应力方向的预裂缝宽  $0.8 \sim 1.0\text{cm}$ 。在粉砂岩地段 ,同样 ,垂直向未形成预裂缝 ,平行方向的预裂缝宽  $3 \sim 6\text{cm}$ 。

针对上述情况 ,改善爆破效果的技术措施是提高全孔的线装药密度 ,主要是提高中段线装药密度。

若爆后地面炮孔间虽无裂缝 ,但孔口有爆破裂隙 ,甚至孔壁上能观察到裂缝。此时若加大线装药密度 ,有可能破坏壁面 ,应慎重待之。最有效措施是将孔距减小 ,以利于形成贯通的预裂缝。

## 2. 地面预裂缝宽度小于 $0.5\text{cm}$

预裂缝宽度和岩石性质密切相关 ,根据东江等工程的经验 ,花岗岩等坚硬岩石 ,很难达到缝宽“ $1\text{cm}$ ”的标准。因此 SL47 - 94《规范》对预裂缝宽并未苛求 ,此类岩石预裂缝宽达到  $0.2 \sim 0.5\text{cm}$  时 ,可以认为选择的预裂爆破参数基本合理。对砂岩、灰岩等中等强度岩石 ,为了保证预裂缝减震效果 ,如预裂缝宽小于  $0.5\text{cm}$  时 ,首先应加大孔口段药量 ,如缝宽仍无变化 ,说明全孔药量偏小 ,应加大中段线装药密度。

## 3. 地面预裂缝宽度在 $2\text{cm}$ 以上

在预裂孔孔口段有临空面的情况下 ,预裂缝宽度在  $2\text{cm}$  以上 ,属正常现象。对较坚硬、完整的岩石 ,预裂缝宽度虽然较大 ,只要缝面平整 ,开口线整齐 ,就可认为爆破参数基本合理。对软弱、结构松散的岩体 ,预裂缝宽度偏大 ,意味着全孔线装药密度偏大 ,壁面可能遭到破坏 ,需将中段线装药密度减小。

# (五) 预裂爆破的几个问题

## 1. 预裂孔孔底以下开裂深度

设计预裂孔的深度 ,必须了解预裂孔底以下开裂深度 ,避免裂缝延伸至建基面以下 ,影响基础岩石的完整性。早期获得的孔底开裂深度资料 ,均为浅孔预裂爆破试验实测数据 ,如葛洲坝粘土质粉砂岩测得预裂孔底以下开裂深度  $0.7\text{m}$  ,万安水电站石英砂岩孔底开裂深度为  $1.5\text{m}$ 。大量施工实践资料表明 ,深孔预裂爆破孔孔底以下开裂深度和预裂孔深度没有明显的关系。葛洲坝二江厂房上游高程  $16.2\text{m}$  平台至建基面(高程  $7.85 \sim 0\text{m}$ )边坡预裂炮孔深度均在  $10\text{m}$  以上。在建基面上 ,对  $200\text{m}$  长的预裂孔轴线进行了调查 ,未见到一条预裂缝的痕迹(钻孔孔底距建基面距离小于  $0.7\text{m}$ ) ,其他工程也有类似情况。分析原因 :①炮孔底部受到较大的夹制力 ,阻止裂缝延伸 ;②深孔孔底岩粉起了软垫层作用 ,缓



冲了爆炸力向下的作用。

为了保证预裂缝面能延伸至建基面,又不伸入基础,葛洲坝大江厂房深孔预裂爆破(最大孔深 38m)均钻至建基面终孔。药卷底部与建基面间预留 0.2m 的空隙。这一措施达到了设计预期的效果。以后许多大中型水利水电工程深孔预裂爆破也按此标准控制,实践证明是成功的。

## 2. 缓冲孔与预裂缝间距及爆破参数

紧邻预裂缝面的梯段爆破最后一排炮孔称为缓冲孔。缓冲孔与预裂缝的距离应考虑岩石性质、药包直径大小、梯段爆破起爆方式及炮孔排数等综合因素。对于岩性软弱、节理裂隙发育的岩石,在爆炸力作用下,岩体稍松动即可挖除,缓冲孔与预裂缝间距可控制在 2m 内。对于中等强度、整体性较好的岩石,如砂岩、灰岩等,间距可控制在 1~1.5m 内。对岩性坚硬、结构完整的岩石,如花岗岩、砾岩等,间距应控制在 1.0m 以内。葛洲坝大江厂房砾岩地段,缓冲孔与预裂缝间距 1.0m,单孔药量由 9.8kg 增大至 14kg,仍有贴膏药现象。单孔药量加大,仅仅使缓冲孔前沿的破碎岩块抛掷距离加大。当间距缩小至 0.5m,单孔药量 9.8kg 时,预裂缝面前的岩块全部破碎,壁面完好(孔深 7m 左右)。说明坚硬、整体性好的岩石,采用排间微差爆破易产生贴膏药现象。梯段爆破起爆方向与预裂缝面垂直或斜交时,缝面前的岩块易爆除。

缓冲孔的药包直径应小于梯段爆破主爆孔的药包直径,一般为主爆孔药径的  $1/2 \sim 2/3$ 。为了根除炮根和防止爆破对后冲方向岩体的破坏,底部 1~2m 药包直径应同主爆孔,上部 1~2m 视炮孔至预裂缝面的距离而定。距离近,应布置小直径药包。缓冲孔单位耗药量同主爆孔,单孔药量应为主爆孔的  $1/2 \sim 2/3$ ,因此其抵抗线和孔距均小于主爆孔。为了避免贴膏药现象发生,缓冲孔孔距应不小于抵抗线。

## 第五节 特种爆破施工技术

### 一、定向爆破筑坝技术措施

定向爆破是一种先进的爆破技术,它利用炸药爆炸能量的作用,可将一定数量的土岩经破碎后,按预定的方向,抛掷到预定地点,形成具有一定质量和形状的建筑物。

在水利水电建设中,可以用定向爆破技术修筑土石坝、围堰、截流戗堤以及开挖渠道、溢洪道等。在一定条件下,采用定向爆破方法修建上述建筑物,较之用常规方法可缩短施工工期、节约劳力和资金。

定向爆破是抛掷爆破的一种特殊类型,它不仅能破坏和抛掷岩石,而且能把爆后的岩块按预定方向抛掷堆积到指定地点。实现定向爆破,必须有适宜的条件。就定向爆破筑坝来讲,地形上应能保证获得足够体积的爆破岩石量、抛掷距离也不太大的“V”型或“U”型狭窄河谷、岩坡山高坡陡、山体雄厚。一般要求,如两岸同时爆破时,则岸坡山高应大于坝顶长度的1.5倍,而且还应大于坝高的1.5倍;当仅采用一岸爆破时,岸坡山高应大于坝顶长度和坝高的2倍。岸坡坡度最好在 $45^\circ$ 以上。从地质条件上考虑,爆区岩体要易于在爆破时控制定向。爆后堆积体稳定。所以,要求岩性较均一,无大断层和破碎带,堆积体不会发生滑动、沉陷和渗透破坏。此外,爆区岩体坚固、新鲜,没有或只有较薄的覆盖层和风化层。

定向爆破坝的施工程序是以大爆破作为中心环节来安排的。大爆破前的施工准备、导洞药室开挖、爆破器材的准备、导流建筑物的修建,以及河床基础处理等项工作的工期,相对而言,都有较大的伸缩余地,而一旦大爆破形成堆石体后,导流立即开始,水库也很快蓄水,从而使爆后的坝面修整、坝身加高,以及斜墙和溢洪道的施工等,都将受到汛期洪水的限制,工期颇为紧张。为减轻爆后的施工强度,最好将爆破日期安排在枯水季节初期。

#### 定向爆破筑坝的设计要点

1. 药包布置 所谓药包布置,就是确定爆区中每个药包的平面座标位置和



药包中心高程。由于影响因素很多,药包布置需要在平面图和剖面图上反复交错进行,反复的过程也就是使药包布置不断完善的调整过程。

在进行药包布置时,药包的最小抵抗线  $W$  与爆破作用指数  $n$  等基本参数均已初步确定。因此,药包布置的主要程序是:

(1) 典型剖面上的药包布置:当地形无特殊变化时,通常以坝轴线剖面作为典型剖面。药包在剖面上的布置顺序是由前排到后排,由下层至上层。前排下层药包中心高程可取为允许的最低高程,根据此高程及  $W_1$  即可定出 I-I 药包在典型剖面上的中心位置。

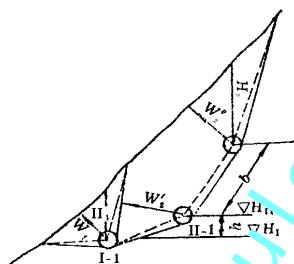


图 9-34 药包在剖面上的布置

为使前排药包爆后形成一个良好的临空面,前后排的下层药包间应考虑以下关系:

$$W_1/W_2 = 0.5 \sim 0.8 \quad (9-20)$$

$$H_{II} - H_I = h = \left( \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \right) n_2 W_2 (m) \quad (9-21)$$

式中  $n_2$ ——后排底层药包爆破作用指数;

上层药包的位置,可在已布置好的底层药包的基础上进行确定。为使同排药包起到共同作用,上下层药包的间距  $b$  可按下式选取:

$$nW \leq b \leq 0.9W\sqrt{1+n^2} (m) \quad (9-22)$$

式中  $W$  和  $n$  均为相邻药包的算术平均值。

当要求的抛掷距离大、大坝率高时,  $b$  值可适当取小一些。

顶层药包的埋置深度  $H$  要加以控制 ,通常要求 :

$$W/H=0.6\sim 0.8 \quad (9-23)$$

此比值过大 ,则抛掷分散 ;过小 ,则上部岩石抛不出去 ,仅崩塌在漏斗中 ,成为无效方量。

(2) 确定定向中心 :定向中心是群药包爆破后 ,岩石集中抛掷堆积的中心点。在平面上 ,同排同层药包的布置 ,就是以定向中心  $O$  为圆心、定向中心距离  $L_R$  为半径的圆弧作为依据的 ,如图 9-35 所示( 图中的  $L_{R1}$  为第一排同层药包的定向中心距离 )。

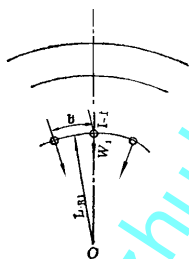


图 9-35 定向中心的确定  
及药包平面布置

根据典型剖面上药包布置的结果 ,可按下式计算各同排同层药包的定向中心距离  $L_R$  :

$$L_R = C_R \left( 5nW + \frac{W}{\sin a} + \frac{Z}{\tan a} \right) (m) \quad (9-24)$$

式中  $a$ ——临空面坡角( 度 );

$Z$ ——药包中心高程至坝顶高程的高差( m );

$C_R$ ——定向中心系数。根据地形条件和建筑物形状选定 ,一般取  $C_R =$

$$\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}。$$

计算出的定向中心应与相应的堆积体重心大致吻合 ,否则需进行调整。

如果坝顶较长,且为单岸爆破时,则应使定向中心靠近非爆区一侧。若为双岸爆破,则两岸爆区应分别选定靠近本爆区一侧的定向中心。山高坡陡的峡谷地段,坝顶不长,一般采用  $n=0.75\sim 1.0$  的崩塌爆破,无需考虑定向中心,此时,只要爆落方量足够,便可取得良好爆破效果。

(3)在平面图上初定药包位置:在平面图上,药包安排、层顺序,在各自的定向弧线上,自坝轴线往两边对称布置。同排同层药包的列间距  $a$  可按式确定:

$$0.5W(n+1) \leq a \leq nW(m) \quad (9-25)$$

同排同层药包数目(列数)的确定,将在抛掷堆积计算中介绍。

(4)沿最小抵抗线方向绘制各药包剖面布置图,量出各药包最小抵抗线的数值。

(5)调整药包位置:由于地形条件的差别,各药包的最小抵抗线不一定都指向定向中心,最小抵抗线的大小也不尽相等。同时,由于地质上的原因,某些药包的原定位置也可能不够合适,这都需要对药包位置加以调整。同排同层药包调整时,可参考下述原则:

- ①各药包中心位置要尽量处于同一高程;
- ②爆破作用指数  $n$  要尽量相等;
- ③列间距可不相等,但不得超过式(9-25)所列的范围;
- ④最小抵抗线的最大差值不得超过最小抵抗线最小值的  $10\sim 20\%$ ;
- ⑤药包平面布置允许在定向弧线两边移动,最小抵抗线方向允许与定向中心偏离一定范围;

(6)不逸出校核:当药包中心距侧面冲沟或山后深沟较近时,为了防止爆破能量朝这些薄弱方向逸出,要求药包中心到薄弱面的距离  $R$  满足下式:

$$R \geq m_R W \sqrt{1+n^2} (m) \quad (9-26)$$

式中  $m_R$ ——不逸出系数。对侧面冲沟  $m_R=1.3\sim 1.4$ ;对山后深沟  $m_R=1.6\sim 1.8$ 。

(7)绘制各排药包的爆破漏斗,进一步检查和调整各药包位置。

2. 抛掷堆积计算的体积平稳法 抛掷堆积计算的目的是要确定爆破漏斗中的介质在炸药爆炸能量作用下,被抛出漏斗的体积,以及相应的堆积范围和堆

积形状。

抛掷堆积计算的体积平衡法是以统计规律为基础建立的计算体系。它计算简便,在一定范围内有较高的准确度。体积平衡法是我国定向爆破设计中广泛采用的一种方法。

(1)爆落方量和抛掷方量计算:在爆破工程中,介质的体积有爆前实方  $V$  和爆后松方  $V'$  的区别。对于一定质量的介质,可有松散系数(或碎胀系数)  $\epsilon$  来表示两者的数量关系:

$$\epsilon = V' / V \quad (9-27)$$

对松软岩石,取  $\epsilon = 1.35 \sim 1.45$ ;对中等硬度岩石,  $\epsilon = 1.40 \sim 1.60$ ;对硬岩  $\epsilon = 1.45 \sim 1.80$ 。

爆落方量是爆破漏斗内全部介质的体积,可根据爆破漏斗剖面图及平面图算出爆落实方  $V_b$ ,然后按下式算出爆落松方  $V'_b$ :

$$V'_b = \epsilon V_b \quad (9-28)$$

抛掷方量是指被抛出漏斗范围之外的介质体积。

为了计算抛掷方量,必须确定可见漏斗尺寸。如坡面平整,在通过最小抵抗线的剖面上,可见漏斗的形状是一个三角形,如图 9-36 中的三角形  $B'DB_k$ 。可见漏斗的上开口点与爆破漏斗的开口点重合,即  $B'$  点。下开口点  $B_k$ (也就是堆积起始点)可由下坡可见漏斗半径  $R_k (= \overline{OB_k})$  来确定:

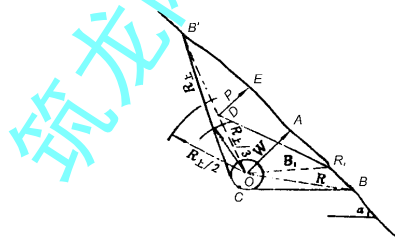


图 9-36 单排药包可见漏斗剖面图

$$R_k = (1.1 \sim 0.33 \operatorname{tg} \alpha) R \quad (9-29)$$

式中  $\alpha$ ——地面坡角(度);

$R$ ——爆破漏斗下破裂半径(m);

式 9-29 适用于地面坡角为  $20^\circ \sim 55^\circ$  的情况。

可见漏斗深度  $P (= \overline{DE})$  是指垂直于原地面方向的原地面与漏斗内堆积线间的最大距离。它的计算公式可按药包位置来选定。

单排药包或双排药包布置中的前排药包:

$$P_1 = (0.27 n_1 + 0.39) W_1 \quad (m) \quad (9-30)$$

双排布置中的后排药包:

$$P_2 = (0.27 n^2 + 0.39) \left( 1 - \frac{W_1}{3 n_2 W_2 \sin \alpha} \right) W_2 \quad (m) \quad (9-31)$$

上两式中,有关符号的脚标 1 和 2 分别表示前排和后排的药包的参数。

根据统计资料,可见漏斗的最深点  $D$  与药包中心点  $O$  的距离在上破裂线  $R_{\perp}$  的  $1/2 \sim 1/3$  之间。

根据  $R_k$ 、 $P$  即可绘出药包的可见漏斗剖面图,如图 9-36 所示。

由爆破漏斗剖面图和可见漏斗剖面图,就可算出滞留在爆破漏斗中的松方介质所占的体积  $V'_L$  (相当于图 9-36 中  $B'CBB_kDB$  范围内的方量),并进而算出滞留实方 ( $V_L$ ):

$$V_L = V'_L / \epsilon \quad (m) \quad (9-32)$$

至此,可算出抛掷实方 ( $V_p$ ):

$$V_p = V_b - V_L \quad (m^3)$$

抛掷松方则为

$$\begin{aligned} V'_p &= \epsilon V_p = \epsilon (V_b - V'_L / \epsilon) \\ \text{即: } V'_p &= \epsilon V_p - V'_L \quad (m^3) \end{aligned} \quad (9-33)$$

(2) 定向爆破堆积体纵剖面的确定,沿坝体纵向(既药包最小抵抗线方向)被抛出漏斗的介质呈三角形分布,如图 9-37 所示。

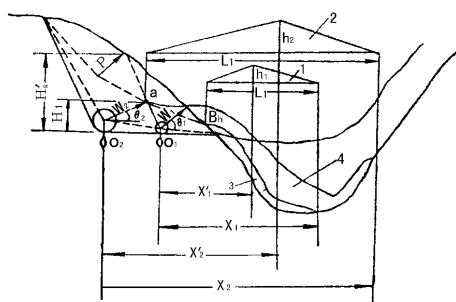


图 9-37 抛掷堆积计算图

1—前排介质质量分布三角形；

2—后排介质质量分布三角形；

3—前排介质堆积体 4—后排介质堆积体

前排药包的堆积起始点就是可见漏斗的下坡开口点  $B_k$ 。前排药包中心至堆积最厚点的抛掷距离  $X'_1$  和药包中心至堆积最远点的抛掷距离  $X_1$  按下列公式计算：

$$X'_1 = \frac{\gamma}{1250} W_1 \sqrt{\frac{3}{n}} (1 + \sin 2\theta_1) \quad (9-34)$$

$$X_1 = 1.6 X'_1$$

上二式中  $\gamma$ ——介质自然容重 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$\theta_1$ ——前排药包抛角，即最小抵抗线与水平线的夹角；

脚标 1 表示前排药包有关参数；

其它符号代表意义同前。

后排药包的堆积起始点为  $a$ 。 $a$  点位于前排药包漏斗的上破裂线上，它与前排药包中心  $O_1$  点的竖向距离为  $H_a$ ：

$$H_a = (0.5 \sim 0.6) \frac{H'_R}{n_1} \quad (9-35)$$

式中  $H'_R$ ——前排药包中心点  $O_1$  至其漏斗上破裂线开口点间的竖向距离。

后排药包自中心点至抛掷堆积最厚点的抛掷距离为  $X'_2$ ：

$$X'_2 = \frac{\gamma}{1250} W_2 \sqrt[3]{kf(n_2)} \cdot (1 + \sin^2 \theta_2) \left( 1 - \frac{W_1}{3n_2 W_2 \sin a} \right) \quad (9-36)$$

式中  $a$ ——地面坡角；

脚标 2 表示后排药包有关参数；

其它符号代表意义同前。

后排药包最远抛距为  $X_2$ ：

$$X_2 = 1.6 X'_2 \quad (m) \quad (9-37)$$

根据求出的抛掷距离  $X'$  及  $X$ ，用作图法可量出质量分布三角形的底长  $L$ ，再根据爆破漏斗中的抛掷面积与此三角形分布面积中介质质量相等的原理，可求出质量分布三角形的高度：

$$h = 2A'_p / L \quad (m) \quad (9-38)$$

$$A'_p = \epsilon A_b - A'_L \quad (m^2) \quad (9-39)$$

式中  $h$ ——质量分布三角形的高度(m)；

$L$ ——质量分布三角形的底长(m)；

$\epsilon$ ——介质松散系数；

$A_b$ ——爆破漏斗(剖面)总面积( $m^2$ )；

$A'_L$ ——漏斗中滞留松散介质的面积( $m^2$ )；

$A'_p$ ——漏斗中被抛出的松散介质面积( $m^2$ )。

按  $L$  和  $h$  值，可将分布三角形绘于河床剖面上部：三角形底边置于水平位置，起点要与抛掷起始点和抛掷最远点一致。按起爆先后顺序将各排质量三角形的纵坐标竖直投影于河床，即得实际堆积体剖面。若为两岸爆破，可和药包布置的多排方式一样，采用纵坐标叠加法。最后尚应根据堆右边坡的稳定性对堆积体外形适当修正。

(3) 爆破堆积体横剖面的确定，爆破堆积体的横剖面通常按梯形考虑。图 9-38 表示横剖面尺寸与药包布置间的关系。

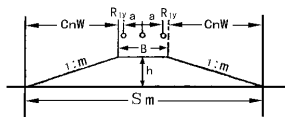


图 9-38 堆积体横剖面与药包布置间的关系

$$B = \sum a + R_{1z} + R_{1y} \text{ (m)} \quad (9-40)$$

$$S_m = B + 2C_n W \text{ (m)} \quad (9-41)$$

式中  $B$ ——堆石体顶宽 (m);

$S_m$ ——堆石体最大底宽 (m);

$\sum a$ ——主药包列间距总和 (m);

$R_{1z}$ 、 $R_{1y}$ ——主药包排中, 两侧边药包的压缩圈半径 (m);

$n$ ——主药包中爆破作用指数的最大值;

$W$ ——主药包中最小抵抗线的最大值 (m);

$C$ ——塌散系数。单列药包或药包规模较小时, 取  $C = 1.5 \sim 2.0$ ; 多列药包或药包规模较大时, 取  $C = 2 \sim 3$ 。一般情况下多列药包  $C = 2.5$ 。

式 (9-41) 是计算最大底宽 (即最大塌散宽度) 的公式。实际上, 在不同的横断面上塌散宽度是不相同的。在地形平面图上, 根据最大塌散宽度、抛掷距离以及漏斗开口尺寸, 可初步绘出平面塌散范围。根据塌散范围, 可以定出各段堆石体横剖面的底宽; 再根据纵剖面图, 定出各段堆石高度  $h_p$ 。这样, 各剖面尺寸就初步确定了。

依据堆石平面塌散范围图和横剖面图, 算出堆石体总体积  $V'_d$ 。根据有效 (上坝) 抛掷 (松) 方量等于堆石体体积的原则, 则

$$V'_d = (1 - \lambda) V'_p \text{ (m}^3\text{)} \quad (9-42)$$

式中  $\lambda$ ——无效抛掷率, 即抛至坝体外的方量与总抛掷方量的百分比率。当介质为岩石时, 一般取  $\lambda = 8\%$ , 在陡坡峡谷区的崩塌爆破中, 可取  $\lambda = 0$ ;

式 (9-42) 起校核作用。如果该式成立, 说明原绘出的堆石体外形无误; 否



则 ,应修正剖面 ,直至满足为止。

3. 爆破效果的预估 通常用以下三类指标来预估定向爆破坝的效果。

(1) 堆石体形状指标 :包括平均堆高、马鞍(最低部位)堆高、堆石体顶宽、最大底宽、堆石项长和边坡等。这类指标用以衡量定向爆破堆石体尺寸是否满足  
设计的基本要求 ,以及估计爆后坝体修整和加高的工程量。

(2) 堆石体质量指标 :包括松散系数(或孔隙率)、堆石块度及级配等。这类  
指标用来估计坝体稳定和渗透性能。目前在设计中对这类指标尚不能完全控  
制 ,只能根据当地的地形、地质条件和爆破规模作某些预估。

(3) 堆石技术经济指标 :包括抛掷百分率、上坝百分率、爆落方单位耗药量、  
抛掷方单位耗药量和上坝方单位耗药量等。

设爆破总用药量为  $\Sigma Q$ 、总爆落方量为  $V_b$ 、总抛掷方量为  $V_p$ 、总上坝方量  
(抛至坝体设计范围内的岩石方量)为  $V_s$  ,则

$$\text{抛掷百分率 } \eta_p = \frac{V_p}{V_b} \times 100\% \quad (9-43)$$

$$\text{上坝百分率 } \eta_s = \frac{V_s}{V_b} \times 100\% \quad (9-44)$$

$$\text{爆落方单位耗药量 } q_b = \frac{\Sigma Q}{V_b} (\text{kg/m}^3) \quad (9-45)$$

$$\text{抛掷方单位耗药量 } q_p = \frac{\Sigma Q}{V_p} (\text{kg/m}^3) \quad (9-46)$$

$$\text{上坝方单位耗药量 } q_s = \frac{\Sigma Q}{V_s} (\text{kg/m}^3) \quad (9-47)$$

## 二、保护层爆破技术措施

水工建筑物对其地基质量要求较高 ,SL47-94“规范”规定:“不应使水平建  
基面岩体产生大量爆破裂隙 ,以及使节理裂隙、层面等弱面明显恶化 ,并损害岩  
体的完整性”。为了满足上述要求 ,国内外大多数水电工程主要采用保护层法开  
挖紧邻水平建基面的岩石。在无试验资料的条件下 ,保护层厚度按 SL47-94  
“规范”表 3.6.2 确定。距设计基础面 1.5m 以内的岩石则需用手风钻逐层钻斜  
孔 ,以 32mm 直径药卷单孔或火炮爆破。分层爆破法的缺点是工期长、机械化程  
度低、劳力消耗多、造价昂贵。例如 :葛洲坝工程基坑开挖的概算单价 ,一般岩石

为  $7.49 \text{ 元/m}^3$ ,保护层开挖为  $15.36 \text{ 元/m}^3$ ,两者相差一倍,扣除挖装运输费,差值达 2 倍以上。许多水电站施工实践表明,保护层开挖与基础清理每个坝段要 10 天以上,其原因是只重视基础质量,不讲究爆破效果,每层(严格说是每次)爆破都留下较深的炮根,实际上分层次数大大多于规定层数(残留岩石需重复爆破)。同时,建基面不平整,撬挖工程量大,既费工又费时。为此,从 20 世纪 70 年代葛洲坝工程起,20 世纪 80 年代万安、东风、隔河岸等水电站,至 20 世纪 90 年代三峡、高坝洲等工程都对保护层快速施工进行了研究,并取得了丰硕成果。

### (一)孔间微差小梯段爆破

孔间微差小梯段爆破是保护层一次爆除最基本的方法,这是经过一些工程的失败教训、成功经验和试验验证得出的结论。1975 年和 1977 年,葛洲坝工程三江基坑和二江厂闸导墙开挖部位都进行了保护层一次爆除试验,二次试验采取的主要技术措施均为不耦合间断或连续装药结构,药卷直径小于  $32\text{mm}$ 。三江试验在平地上进行,在  $10.3\text{m} \times 10.3\text{m}$  范围内布置 307 个炮孔(孔排距平均  $0.6\text{m}$ ),孔深  $2 \sim 3\text{m}$ 。试区分为三个小区,分别布置 1、3、5 段雷管。爆破效果差,最大影响深度  $1.1\text{m}$ 。二江厂闸导墙宽  $8\text{m}$ ,长  $80\text{m}$ ,上游和左侧临空,右侧为预裂缝面,分三个试区进行试验。两个试区沿垂直左侧临空面方向( $8\text{m}$ 宽)按炮孔数量大致等分为五个区,并分别布置 1~5 段雷管。虽然临空面条件好,但因雷管段别少,并未实现排间微差爆破,每段雷管起爆 1~3 排炮孔。试区岩石软弱,地面以下  $3 \sim 4\text{m}$  为砂岩夹粘土岩,其下为粘土质粉砂岩、粘土岩、砂岩互层。爆破前后进行了压水和地震法测试。由于粘土岩有遇水膨胀的特性,爆破前后基岩透水性变化不大,甚至出现爆后透水性减小的现象。地震法测得爆破最大影响深度为  $0.7\text{m}$ 。由于群孔起爆,震动影响大,左上角二侧临空的部位,炮孔底部  $1.2\text{m}$  层面错动。二次爆破试验失败的主要原因是:

(1)仅考虑了小直径药卷和不耦合装药结构降低爆破震动效应及减小炮孔底部爆破影响范围的作用,对多孔平地爆破方式的影响认识不足。

(2)受到国内爆破器材发展水平的限制。保护层爆破的孔网参数小,炮孔数量多,当时广泛应用的是五段毫秒电雷管,难以实现排间微差梯段爆破。

万安水电站于 1982 年、1985 年进行了 8 组保护层一次爆除试验。特别是第二阶段试验,试区面积大,接近生产规模。试区属微风化长石石英砂岩,岩石坚硬但整体性差、断层、软弱夹层、层面裂隙及构造裂隙等相当发育。试验要求

将厚度 1.5~2.0m 的基岩一次爆到预定高程,超欠挖值在允许范围内,清基后基础面质量良好,达到基础终验标准,基岩深部不产生破坏影响,原有软弱构造不因爆破影响而恶化。为了达到上述要求,试验人员主要研究了下列措施:

(1)用小梯段爆破取代平地爆破。SDJ211-83 规定保护层开挖方式是一个自由面的平地爆破,虽然火花起爆限制了爆破规模,但它是杂乱无章地一孔一孔起爆,和按一定顺序起爆的平地掏槽爆破性质不同,单位耗药量大,爆破效果差,炮眼残留率高。改用梯段爆破后,增加了侧向自由面,上述缺点可得到明显克服。

(2)采用毫秒电雷管取代火雷管,实现排间微差梯段爆破。

(3)用小直径乳化药卷代替硝铵药卷。可使装药分散,不耦合系数加大,单耗降低,震动影响减小。

(4)底部设缓冲层的装药结构。即在炮孔底部设置一种排水型的体积可变的柔性垫层,使药卷不与炮孔底部直接接触。

(5)控制钻孔精度,加大密集系数,可以改善爆破效果,减小超欠挖工程量。

根据研究思路,对爆破孔网参数,装药结构,起爆方式等进行了如下精心设计:

(1)单位耗药量。国家定额规定,Ⅱ级岩石保护层石方开挖单耗为  $0.76\text{kg}/\text{m}^3$ ,试验改用梯段爆破后,单耗取  $0.35\sim 0.47\text{kg}/\text{m}^3$ ,岩性软弱或断层构造发育时取低值,岩性坚硬时取高值。

(2)炮孔斜度。采用垂直钻孔,以利于控制孔底高程和孔排距钻孔误差,提高试验资料的精确性。

(3)抵抗线(排距)。取梯段高度(1.5m)的 0.4~0.5 倍,即为 0.6~0.75m。

(4)炮孔密集系数。将一般采用的 0.8~1.2 加大到 1.67~2.5,按梅花形布孔,以利消除炮孔根底。

(5)超钻深度。炮孔钻至建基面,不超深。

(6)堵塞长度。等于或略小于各排抵抗线,一般为 0.5~0.7m。

(7)设柔性垫层。层厚 18cm。

(8)单孔药量及装药结构。单孔药量根据单位耗药量和孔网参数确定,一般为 400~800g/孔。装药结构有全孔装直径 25mm 药卷,全孔装 32mm 药卷和底部装 32mm 药卷上部接 25mm 药卷三种形式,视地质条件选用。药卷均为厂家

生产的乳化炸药定型药卷。

(9)起爆方式。采用排间微差起爆方式。一般 7 排布置 7 段雷管,最多一次分 17 排布置 17 段雷管。1~4 段为 25ms 等间隔电雷管;15~17 段雷管间隔时间大于 50ms。

爆破后经过地质测绘、孔内电视录像、基岩面调查、注水试验、岩体声速观测和爆破时各种动态力学参数的观测,都证明了试验所采取的小梯段毫秒爆破等一系列综合措施是合理的,爆堆、飞石、块度等指标均在允许范围内,爆破对底部基岩的影响深度一般在 0.3m 以内,平均根底率为 2.9%,平均超挖率为 4.7%,基岩面经过人工整修后,达到了基础终验标准。

试验成果证明,万安保护层一次爆除试验是成功的,这一点在生产中也得到论证。

东风水电站于 1988 年进行了保护层一次爆除试验,采用了塑料导爆管毫秒雷管爆破网络。爆破试验在万安水电站已获得成功经验的基础上作了进一步改进。它模拟了火炮一孔一炮的起爆方式,但又非杂乱无章地随意爆破,而是按一定顺序依次起爆的孔间微差爆破,它不仅使单段药量减小,而且每个炮孔有双向临空面(除顶面外),爆破效果大大改善,对炮孔底部的破坏影响也随之减小。东风水电站实测数据证明其破坏范围比火炮小得多。东风保护层孔间微差爆破网络见图 9-39。

## (二)浅孔松动爆破配合水平光面爆破或水平预裂爆破

采用水平光面爆破或水平预裂爆破一次爆除保护层是 20 世纪 90 年代发展起来的爆破技术。它的主要优点是,建基面平整,超欠挖工程量小。水平预裂或水平光爆采用不耦合间断装药结构对地基的不良影响小。

三峡工程基岩主要为闪云斜长花岗岩,岩体完整坚硬,但属古老多隐裂隙岩体,在卸荷和爆炸应力作用下,隐蔽裂隙易张开。据地质部门提供的信息,三峡工程边坡马道基础验收时发现,采用分层法开挖的保护层,隐蔽裂隙易张开,建基面凹凸不平,超欠挖工程量大。采用水平预裂爆破或水平光面爆破开挖保护层。建基面平整,基础完整,超欠挖工程量小。所以三峡工程永久船闸、升船机、泄洪与挡水大坝等建筑物地基主要采用水平预裂或水平光爆方式开挖保护层。如永久船闸闸室建基面近 7 万  $\text{m}^2$  采用水平光面爆破方式开挖保护层。保护层厚度 2.5m,布置一排光爆孔,孔径 40mm,孔距 40cm。光爆孔上部设一排水平

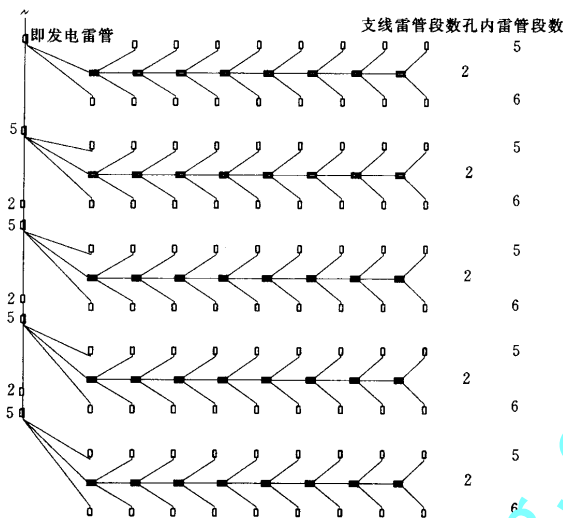


图 9-39 编号 880815 爆破网络图

主爆孔孔距 1.5m。爆后建基面平整,起伏差一般小于 15cm,半孔率达 98% 以上,确保了闸室基础质量。

三峡二期工程泄洪与挡水大坝(包括左导墙)建基面高程为 50.0~8.0m,建基面面积为 8.8 万  $\text{m}^2$ ,石方开挖工程量为 215 万  $\text{m}^3$ ,其中保护层工程量为 26 万  $\text{m}^3$ ,要求月开挖强度达到 6 万  $\text{m}^3$ 。工程具有钻爆工作量大,开挖强度高,地质条件复杂,基础质量要求高的特点,采用传统的保护层分层爆破开挖法无法满足施工进度和基础质量的要求。因此,施工单位采用水平预裂爆破辅以垂直浅孔梯段爆破法开挖保护层。实践证明这一决策是正确的。

根据招标文件的有关规定,并结合三峡地区现场生产性爆破试验成果对比分析,确定保护层厚度为 2.5~3.0m。

水平预裂爆破按钻孔直径大小取不同参数如下:

(1) 钻孔直径  $D_1$ 、 $D_2$ 。  $D_1 = 100 \sim 105\text{mm}$ ,  $D_2 = 45 \sim 50\text{mm}$ 。

(2) 药卷直径  $d_1$ 、 $d_2$ 。  $d_1 = 32\text{mm}$ ,  $d_2 = 25\text{mm}$ 。

(3) 钻孔间距  $a_1$ 、 $a_2$ 。  $a_1 = 80 \sim 100\text{cm}$ ,  $a_2 = 40 \sim 50\text{cm}$ 。

(4) 钻孔深度  $L_1$ 、 $L_2$ 。  $L_1 \leq 10\text{m}$  ,  $L_2 \leq 3.0\text{m}$ 。

(5) 线装药密度  $q$ 。经生产性试验不断调整 ,最终确定  $q = 380 \sim 450\text{g/m}$  (  $D = 100 \sim 105\text{mm}$  )。

水平预裂爆破与边坡预裂爆破有着本质区别。边坡预裂爆破是在半无限体中进行的 ,底部夹制作用较大。水平预裂爆破相当于  $2.5 \sim 3.0\text{m}$  的光面层爆破 ,是在有限体中进行的 ,底部夹制作用小 ,因此装药结构较为简单。一般按设计的线装药密度由上至下均匀分布药量 ,在孔底  $40\text{cm}$  范围内 ,线装药密度约增加 1 倍。孔口堵塞长度以下  $50\text{cm}$  范围内线装药密度减少约  $1/2$ 。堵塞长度一般取  $80 \sim 100\text{cm}$ 。

浅孔梯段爆破参数如下 :

(1) 钻孔直径  $D_1$ 、 $D_2$ 。  $D_1 = 105 \sim 89\text{mm}$  ,  $D_2 = 45 \sim 50\text{mm}$ 。

(2) 药卷直径  $d_1$ 、 $d_2$ 。  $d_1 = 50\text{mm}$  ,  $d_2 = 32\text{mm}$ 。

(3) 钻孔深度  $L$ 。保护层厚度  $2.5\text{m}$  时 ,  $L = 1.7 \sim 1.5\text{m}$  ;保护层厚度  $3.0\text{m}$  时 ,  $L = 2.2 \sim 2.0\text{m}$ 。

(4) 钻孔间距。孔径  $89 \sim 105\text{mm}$  时 ,孔距  $1.5 \sim 1.8\text{m}$  ,排距  $1.0 \sim 1.2\text{m}$ 。

孔径  $40 \sim 45\text{mm}$  时 ,孔距  $1.0 \sim 1.2\text{m}$  ,排距  $0.5 \sim 0.6\text{m}$ 。

(5) 单位耗药量 : $q$ 。  $q = 0.5 \sim 0.5\text{kg/m}^3$ 。

三峡二期主体工程基础保护层开挖通过应用水平预裂爆破辅以垂直浅孔梯段爆破的施工方案 ,达到了高质量、快速开挖保护层的目的 ,经过建基面残留炮孔痕迹进行检查与统计分析 ,在微新岩中其半孔率一般为  $93\% \sim 98\%$  ,平均半孔率大于  $95\%$  ,在局部地质缺陷部位 ,其半孔率均在  $80\%$  以上。满足设计要求。相邻水平炮孔间的不平整度最大  $30\text{cm}$  ,最小  $5\text{cm}$  ,一般控制在  $10 \sim 20\text{cm}$  ,基本满足  $15\text{cm}$  的设计要求。泄洪坝段及左厂  $11 \sim 14$  号坝段的基础岩体经弹性波测试 ,其波速最大达  $5300\text{m/s}$  ,最小  $3700\text{m/s}$  ,平均波速值在  $5300\text{m/s}$  以上 ,满足波速  $5000\text{m/s}$  的设计要求。由业主组织的参建四方基础验收小组检查验收后认为 ,建基面无明显的爆破裂隙 ,水平建基面平整 ,开挖高程及轮廓边线均满足设计要求。

根据资料统计 ,高峰期资源投入情况为 :KQL-100 型快速钻 43 台 ,CM351 液压钻 4 台 ,ROC848 液压钻 8 台 ,手风钻 55 台 ,钻爆人员 120 人 ,基础清理人员 210 人。保护层月最高开挖量  $6\text{万 m}^3$  ,月完成建基面开挖面积  $1.7 \sim 2.0\text{万}$



$\text{m}^2$  ,建基面清理最高强度为  $3 \text{ 万 m}^2$ 。与分层开挖保护层方法相比 ,该方法在资源投入上节省人力  $1/2 \sim 2/3$ 。开挖工效可提高  $2 \sim 3$  倍 ,建基面质量明显优于分层开挖爆破法。

### (三)无保护层爆破法

20 世纪 80 年代初湖南长江水电站双曲拱坝坝基开挖中首先采用了无保护层一次爆破法 ,其后 ,紧水滩等其它水利水电工程也相继采用并获得成功。

东江水电站混凝土双曲拱坝 ,最大坝高  $157\text{m}$  ,底宽  $35\text{m}$  ,顶宽  $7\text{m}$ 。高拱坝对坝基变形敏感 ,抗力要求高 ,设计制定的基础开挖原则是 :岩体纵波速度为  $5000\text{m/s}$  ,坝基按变圆心、变半径、变中心角、全径向控制断面 ;成型后的坝基两岸对称 ,超欠挖值按设计与施工规范严格控制。为了保证上述要求的实现 ,在大规模爆破试验取得丰硕成果的基础上 ,决定坝基的建基面及上、下游坡面采用三面预裂爆破 ,不留保护层的方式开挖。

左岸自坝顶高程  $294\text{m}$  ,右岸自高程  $270\text{m}$  (以上为重力坝)开始 ,向下开挖 ,每垂直  $10\text{m}$  为一台阶 ,每一台阶开挖工程量约  $1 \text{ 万 m}^3$ 。为方便施工 ,每一台阶设  $0.75\text{m}$  宽平台一道。建基面预裂孔按水工建筑物基础开挖图逐孔计算方位和孔深。上、下游边坡钻孔倾角分别为  $3.5:1$  和  $4:1$ 。

预裂爆破参数如下 :

(1) 钻孔孔径  $D$ 。  $D = 90 \sim 110\text{mm}$ 。

(2) 钻孔孔距  $a$ 。  $a = (8 \sim 10)D$  ,上、下游边坡取大值 ,建基面取小值。

(3) 钻孔孔深  $L$ 。  $L = 10 \sim 15\text{m}$ 。

(4) 线装药密度  $q$ 。  $q = 600 \sim 700\text{g/m}$ 。

装药结构按设计线装药密度将直径  $32\text{mm}$  药卷绑扎在导爆索上。底部  $1\text{m}$  范围内药量加倍。堵塞长度  $0.8 \sim 1.2\text{m}$ 。

预裂孔底距设计面  $20 \sim 30\text{cm}$ 。

梯段爆破孔 ,孔径  $110\text{mm}$  ,药径  $90\text{mm}$  ,孔底至预裂面间距  $1.5\text{m}$ 。

两岸坝基开挖后 ,出露的建基面轮廓清晰、平整。上、下游边坡稳定。经基础验收小组初验的 16 个台阶 (左岸 11 个、右岸 5 个)建基面预裂孔半径率为  $87.5\%$  ,爆破影响深度 (不是破坏深度)  $0.4\text{m}$  左右。超挖平均值  $18\text{cm}$  ,欠挖平均值  $10\text{cm}$ 。建基面纵波波速为  $5000\text{m/s}$  ,开挖质量达到了设计要求。与预留保护

层方法相比,每  $\text{m}^2$  预裂面可节省 13 元左右。

东江水电站河床坝基采用水平预裂爆破和水平抬炮(2~3 层),同样取得了良好的爆破效果。

### 三、水下围堰或岩坎拆除爆破技术措施

大部分水利工程是在围堰或岩坎保护下进行干地施工的。在主体建筑物完工后,土石围堰的混凝土防渗墙,或混凝土围堰,或岩坎均需进行爆破拆除。一般拆除部位邻近主体建筑物,需进行控制爆破。现以黄河禹门口提水工程一级站岩坎拆除爆破为例,作简要介绍。

一级站岩坎顶高程 379m 左右,顶宽一般小于 2m。岩坎拆除高程为 370.61m 和 369.9m,此高程拆除范围,顺水流向长 40m,垂直水流向最大长度岩坎中段拆除断面见图 9-40。

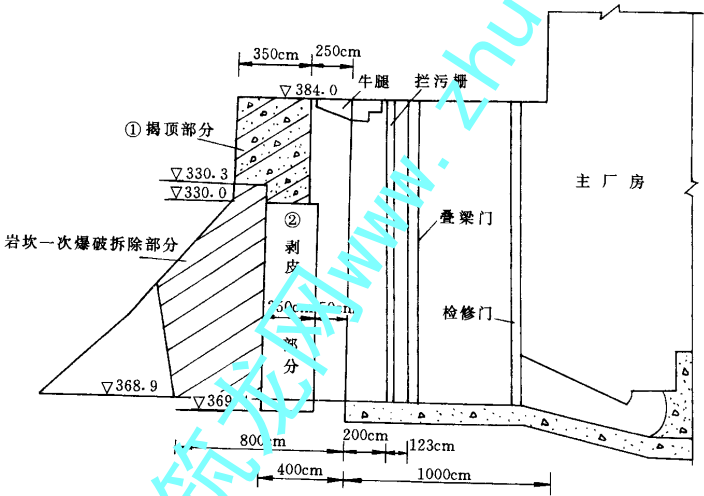


图 9-40 黄河禹门口提水工程一级岩坎拆除爆破施工图

岩坎拆除爆破时,其防护目标为“两桥一线”,进水闸及主、副厂房建筑物等。一级站进水闸混凝土已浇筑至 384.0m 高程,主、副厂房部分混凝土已浇筑至



390.5m 高程。爆区与各防护对象间的最近距离为：闸墩前缘 0.1m，拦污栅 4m，叠梁闸门 5.2m，主厂房 12m，国家级通讯线 40m（上方），黄河铁路桥 80m，公路桥 67m。爆破产生的危害主要是飞石、爆破震动及水中冲击波对建筑物的破坏影响。根据不同防护对象的具体情况，其安全防护要求为：①爆破飞石不得损坏已建的一级站建筑物，爆破震动不得对建筑物（如闸墩、底板、闸门及门槽、上部板梁柱结构等）产生破坏影响。振动速度的安全标准定为  $15\text{cm/s}$ 。②爆破飞石不得损坏国家级通讯线。③爆破飞石及震动对铁路桥墩、钢桁架、桥头填方及其他设施均不得产生破坏性影响，其振动量值控制在允许范围内（ $5\text{cm/s}$ ）。④爆破震动及飞石对锚索、锚锭不得产生损坏性变形，钢立架及锚索的振动均在允许范围内（ $5\text{cm/s}$ ），不允许飞石击伤锚锭和锚索等。⑤不允许爆破水中冲击波对陕西一侧的河岸桥头填方产生破坏影响。针对上述要求进行了岩坎爆破拆除设计。

1. 爆破参数确定。

（1）抵抗线、排距、孔距。为了弥补基岩地形资料不准，防止孔底抵抗线过大，采用小排距密孔的布孔方式。顺轴线将岩坎分为 43 个断面。称断面间距为排距，同一断面炮孔间距为孔距。根据岩坎地形和开挖断面轮廓布孔，各段孔底，孔口的抵抗线、排距孔距均不相同，其变化范围为：

抵抗线	孔底	2.5~2.0m（上下游段）
	孔口	1.0~0.8m
排距	孔底	1.2~0.8m
	孔口	1.0~0.5m
孔距	孔底	2.0~1.5m
	孔口	0.4~0.3m

（2）梯段高度。

上游  $380.8 - 370.6 = 10.2\text{m}$

下游  $380.5 - 369.6 = 10.9\text{m}$

（3）超深、孔深。取超深为 1m，则最大孔深（当炮孔倾斜  $30^\circ$  时）为

$$L = H/\cos 30^\circ + \Delta L = 10.2/0.866 + 1.0 = 12.78 \approx 13\text{m}$$

（4）单位体积耗药量。开口段，上、下游段外侧炮孔按加强抛掷爆破选取单

位体积耗药量 ,以利打开临空面 ,保证爆破后开挖到位。内侧炮孔按松动爆破选取单位体积耗药量 ,以求岩体破碎 ,又不致产生过大的后冲破坏。

岩坎爆破综合单位体积耗药量用下式计算 :

$$q = 0.90 + 0.90H_{\text{水}} + 0.02H_{\text{泥}} + 0.03H_{\text{梯}}$$

式中  $H_{\text{水}}$ ——水深  $\text{m}$  ;

$H_{\text{泥}}$ ——泥沙高度  $\text{m}$  ;

$H_{\text{梯}}$ ——梯段高度  $\text{m}$ 。

取  $H_{\text{水}} = 10\text{m}$  ,  $H_{\text{泥}} = 6\text{m}$  ,  $H_{\text{梯}} = 10.5\text{m}$  则

$$q = 0.9 + 0.01 \times 10 + 0.02 \times 6 + 0.03 \times 10.5 = 1.4\text{kg}/\text{m}^3$$

各段根据所在位置取不同的单位体积耗药量 ,每段各炮孔又按外、中、内位置取不同单位体积耗药量。其平均数值为 :

开口段  $q = 1.90\text{kg}/\text{m}^3$

下游段  $q = 1.44\text{kg}/\text{m}^3$

直线段  $q = 1.29\text{kg}/\text{m}^3$

上游段  $q = 1.43\text{kg}/\text{m}^3$

(5)最大一段单段药量。取岩坎距叠梁门最近距离的断面作为计算断面 ,按类似工程的质点振动速度公式计算 ,振速为  $15\text{cm}/\text{s}$  时的允许药量在  $67.3 \sim 23\text{kg}$  之间。结合装药结构确定最大一段单段药量为  $24.1\text{kg}$ 。

(6)总药量。综合单位体积耗药量为 :

总药量  $\Sigma Q = 2306.8\text{kg}$

总体积  $\Sigma V = 1640.0\text{m}^3$

综合单位体积耗药量  $q = \Sigma Q / \Sigma V = 1.406\text{kg}/\text{m}^3$

2. 装药结构设计。根据每个炮孔的位置、爆破部位形状和承担的方量 ,设计不同的装药结构。

(1)最外侧炮孔。上、下游段(包括开口段)需要打开临空面 ,单孔药量均采用允许的最大单段药量  $24.1\text{kg}$ 。一般情况采用大药包 ,药量集中在底部 ,装药长度  $6.8\text{m}$ 。保证上部堵塞长度在  $5\text{m}$  左右 ,不致因堵塞短而造成飞石。为避免因炮孔堵塞过长表面产生大块 ,地表布置  $1 \sim 2$  排手风钻机 ,在该部位岩块脱离

岩体后起爆,起解炮作用。

(2)中间炮孔。上游段炮孔孔底距较大,孔口距较小。按药包直径由小到大,呈三层宝塔形,各层长度因断面形状而异。下游段炮孔排距较小,将大药包布置在底部,起铲除根底的作用。上部连续绑扎小药包,起破碎岩块的作用。直线段破碎岩石的药量主要由中间孔承担,装药量最大。中间炮孔还需控制装药高度,使药包顶部内、外侧岩体厚度大致相等,以防止后冲向破坏和上部产生大块石,一般不装药段长度为 $1.2\sim 2.0\text{m}$ 。

(3)内侧炮孔。内侧炮孔主要起破碎岩块的作用,为防止后冲破坏,选取较小的单耗,根据单耗大小确定装药结构。不装药段长度 $3.0\text{m}$ 左右。

(4)爆孔内起爆结构。为了提高炮孔起爆的可靠性,孔内设两根导爆索,全孔药包均绑在导爆索上。由4个非电毫秒雷管引爆,其中两个绑在孔口以下 $1.5\text{m}$ 处的导爆索上,两个绑在 $6\text{m}$ 以下的药包内。

3. 爆破网络设计。经多方案研究论证,决定采用 $1\sim 10$ 段非电毫秒雷管组成3组非电爆破网络。开口段共8孔,孔内分别选用 $1\sim 8$ 段非电毫秒雷管引爆。每孔设两组4个同段的雷管,每组导爆管在孔外并联,由2个1段毫秒雷管引爆。下游段、直线段和上游段分两组,采用复式交叉并串联网路,见图9-41。地面网络由3段非电毫秒雷管组成。选用理由是:

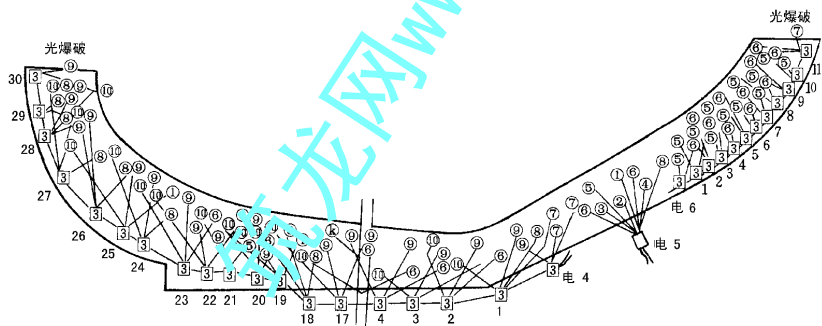


图9-41 黄河禹门口一级泵站岩坎围堰拆除爆破网络图

(1)干线起点至终点传递时间短,结点雷管和孔内高段雷管同时点燃,传过干线几个结点(一段距离)后炮孔才起爆,这就不会破坏起爆网络。

(2) 相邻结点时差为 50ms ,大于 10 段非电毫秒雷管的误差 35ms ,这就不致使分别联结相邻结点的同段雷管出现重爆或前爆的事故。

选择孔内雷管的原则是 :①同一组网络引爆雷管的时差不能是 50ms 的倍数。如下游段选用 5 段( 110ms ) 6 段( 150ms )非电毫秒雷管 ,5、6 二段的起爆间隔时间为 40ms。直线和上游段选用 8 段( 250ms ) 9 段( 310ms ) 10 段( 380ms )非电毫秒雷管 ,它们之间的时差分别为 60ms 和 70ms。避免不同结点的炮孔重段。②控制同排相邻炮孔引起爆时差为 10 ~ 50ms ,前后排间隔时差最大为 100ms。③每个炮孔 4 发雷管 ,实际起作用的是起爆延时最短的雷管 ,用雷管标准延时和最大负误差延时来校核每个炮孔起爆延时 ,不允许出现重段。

下游段网络由 6 段( 150ms )毫秒电雷管引爆 ,控制炮孔起爆延时尾数为“ 0 ”。直线段和上游段网络由 4 段( 75ms )毫秒电雷管引爆 ,控制炮孔起爆延时尾数为“ 5 ”。保证上、下游炮孔按标准延时计算不重段。

#### 四、水下岩塞爆破技术措施

在天然湖泊或已建成的水库中 ,如果有灌溉、发电、泄洪以及放空水库等的需要 ,就必须在深水下打通取水口 ,修建取水口工程。打通取水口的方法常采用围堰施工或水下岩塞爆破施工。岩塞爆破施工 ,就是用一般的钻孔爆破方法 ,先从引水洞的出口处开挖起 ,一直挖到引水隧洞的前部与库边或湖底联接处 ,然后预留一定厚度的岩塞 ,待隧洞工程全部竣工后 ,一次岩塞炸除 ,打通取水口。

采用围堰方式修建取水口 ,要受库水位影响。取水口通常在库水位以下几十米深处 ,使得围堰工程量很大 ,技术比较复杂 ,且取水口建成后 ,围堰拆除也很困难。采用水下岩塞爆破就有其特殊的优越性 :第一 ,它不受库水位影响或季节条件的限制 ;第二 ,省去了围堰工程 ,可节约大量材料、劳力及运输设备 ;第三 ,岩塞爆破施工的工效高、工期短、投资低。所以对已建成的水库 ,特别是在正常运行、有发电水位要求而修建围堰又有较大困难的大水库 ,采用水下岩塞爆破打通取水口 ,是一种较好的施工方法。

##### (一) 岩塞爆破设计要点

1. 岩塞位置及尺寸 岩塞位置的选择要根据引水隧洞的使用条件及岩塞部位的地质因素来决定。首先要有高精度的水下地形测量和地质勘探资料 ,同

时要详细查明水下岩塞部位的覆盖层深度、岩石风化程度及地质构造,特别是断层及节理走向、倾角和胶结情况。要将岩塞选在岩石较好的地段,尽量避免不利的断层及节理构造。岩塞开口尺寸要满足泄量要求,并使水流平顺和避开冲刷岩塞周围岸坡。在满足上述条件的情况下,尽量减少岩塞尺寸,以便减轻爆震影响和减少开挖工程量。目前已建成的工程中,岩塞厚度一般为直径的 1.0~1.5 倍,太小则不安全,太大又难于一次爆通,成型也不好。

## 2. 药室布置及爆破网路

(1) 药室布置 水下岩塞爆破有排孔爆破、裸露药包爆破和洞室爆破几种方式。洞室爆破又有单层药室及多层药室之分。

排孔爆破适用于小直径引水隧洞或开挖洞室有困难的工程。施工比较安全,机械操作方便,爆破震动小,是这一爆破方式的特点。

裸露药包爆破属于辅助性的爆破,一般布置在岩塞迎水面上。

单层药室爆破时,药室布置的位置要考虑岩石重力作用及水压力等因素,尽量使上下两方面的阻力相等,或向库内(湖内)的爆破力稍大于向洞内的力量,以防爆破能量向洞内集中逸出而爆不开岩塞口。单层药室布置具有开挖的导洞较短、施工方便和安全等优点。但岩塞的成型条件差,单位用药量也较多。

多层药包布置时,一般上下层为单药室,中间为多药室,或者上层为单药室,中下层为多药室。中层药室布置一般有环形和王字形两种。环形布置的药量分布比较均匀,形成的开口条件好,并节省洞室的回填量,但药室的开挖施工比较困难。王字形药室虽然回填工程量大,但施工方便,所以应用仍较多。图 9-42 是环形药室布置图,图 9-43 是王字形药室布置图。

多层药室布置装药分散,成型条件好,单位用药量也较少,只是洞室导洞的开挖和回填工程量为其缺点。

(2) 药量计算及爆破参数选择 水下岩塞爆破的药量计算通常采用下式:

$$Q = KW^3(0.4 + 0.6n^3) + \Delta Q \text{ (kg)} \quad (9-48)$$

式中  $\Delta Q$ ——增加药量(kg)。根据工程实践经验,增加的药量一般为上部药室药量(直接受水影响的药室药量)的 20~30%。

爆破作用指数  $n$  值的选择:由于岩塞爆破中考虑有水的影响,故不考虑岩碴的抛掷,而主要是考虑爆破漏斗开口尺寸及爆破岩石块度。我国近年来的

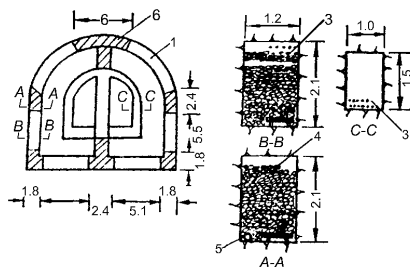


图 9-42 环形药室布置示意图(单位: cm)

1—药室 2—堵塞部分 3—炸药;

4—沙袋 5—排水管

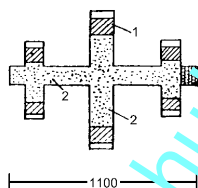


图 9-43 王字形药室

布置示意图(单位: cm)

1—药室 2—堵塞部分;

3—砌砖堵塞

工程实践经验认为,  $n$  值选用在 1.0~1.5 范围内较为合宜。较小的  $n$  值对减少药量和降低爆破震动是有利的。

单位耗药量  $K$  值的确定: 确定  $K$  值时, 对水的影响可先不考虑, 只根据岩石抗压强度、岩石容重、开挖等级及现场试验数据等几种不同的角度综合考虑确定, 然后再考虑水深的影响。水深对  $K$  值的影响, 目前在水下岩塞爆破中, 是结合工程经验及参照有关经验公式确定的, 通常要增大 20~30%。

(3) 关于起爆方面的问题: 为了达到预期的爆破效果和减少震动影响, 在起爆系统中, 一般采用分段毫秒雷管控制各药包的爆破顺序。

为了控制岩塞爆破开口形状, 减少爆破振动影响, 通常要在岩塞周围打设预



裂爆破孔,使之形成预裂缝。国内在水下岩塞爆破中采用的预裂孔间距为30cm,孔径为45~55mm,孔深为3~8m,每米装药量为270g,小直径药包连续装药,爆后成型良好。

起爆网路的选择,关系到能否安全准爆。通常多采用复式并一串一并的联结方式,有时还增加一套导爆索网路。

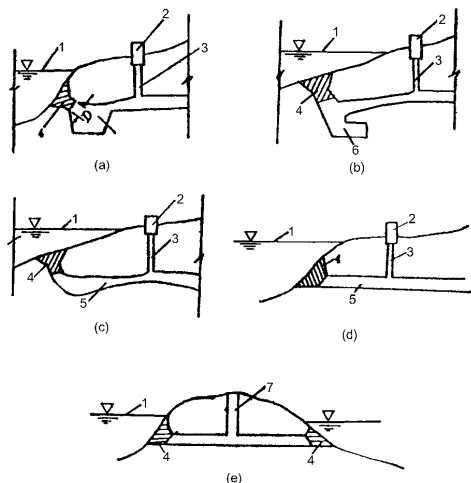
3. 岩碴处理措施 妥善处理爆破后的大量石碴,是保证爆通和运行安全的重要问题。一般根据工程修建的不同目的,处理爆后碴石的措施有三种:

(1)集碴方式 主要在引水发电工程中采用,其方法:在岩塞下面的隧洞内预先挖好一个集碴坑,容积除保证容纳爆落的岩碴外,并要求在取水建筑物运行期间坑内石碴不致被水流带走。当洞内流速较小时,可采用如图9-44(a)所示的矩形集碴坑;当流速较大时,可根据实验采用其它形式,如图9-44(b)所示,即是其中的一种。

(2)排碴方式 通常用于防洪灌溉和特殊需要的泄水工程。其方法:在爆破时引水隧洞下游的闸门敞开,洞内不设集碴坑,但为了防止爆破瞬间碴块拥挤,可设一个容量相当于石碴松方总量 $1/4 \sim 1/5$ 的流线型缓冲坑,如图9-44(c)所示;当泄水洞洞径不大,且爆后的碴量又很少时,也可不设缓冲坑,如图9-44(d)所示。

排碴的方式使爆落的石碴随气浪及水流一起将它冲到下游河道的一种方式,因而大大减少或取消了集碴坑的开挖量,使地下工程结构简化。与集碴方式相比,水流条件较好,在引水隧洞运行过程中也不必担心出现水流将石碴带走的危险。泄碴方式的缺点是大量石碴通过隧洞时,有把洞内衬砌和埋件磨损或破坏的可能性,需要采取一定的防护措施。同时,宣泄到下游的石碴也需要进行清理,加大了施工工作量。在大型水库或湖泊采用泄碴方式时,必须保证爆后洞内控制水流的闸门能及时下闸。

(3)洞内储碴方式 适用于相邻水库或湖泊的供水工程。其方法:在爆破时洞内敞开,不设集碴坑及缓冲坑,也不设闸门,两个进水口同时爆破,借助于抛掷以及水流和气浪作用将石碴少部分抛到库内,大部分石碴均匀分布在引水洞内,其布置如图9-44(e)所示。



**图 9-44 各种岩碴处理措施示意图**

(a)集碴坑之一 (b)集碴坑之二 (c)设缓冲坑的排碴方式；

(d)不设缓冲坑的排碴方式 (e)洞内储碴方式

1—爆破水位 2—启闭机室 3—闸门井；

4—岩塞 5—泄水洞 6—集碴坑 7—施工竖井

## (二)水下岩塞爆破施工中的有关问题

1. 药室开挖 岩塞爆破药室开挖的特点是工作面小,规格尺寸要求严格。所以应采用浅孔小炮及打超前孔,以便了解渗水及岩石情况等。

2. 渗漏处理 由于岩塞处的岩石上面常常有几十米水头作用,而药室在库水位以下,加之岩石往往存在一定的节理裂隙等地质构造,所以在药室开挖过程中必然会遇到渗水、漏水问题。渗透会直接影响开挖和装药工作,起爆体长期浸水会失效,堵塞材料泡水后会降低封堵作用,所以,必须设法加以处理。处理的办法有两种:一是打管引流,二是灌浆封堵。但灌浆会使岩塞上部的外水压力增加,是一种不安全因素,应引以为注意。

3. 爆破材料防水问题 工程实践证明,将毫秒雷管放在橡皮球内,封闭后涂上黄油即可防水,起爆体和导爆索的防水处理,可将其放入塑料袋(管)中,封闭后涂上黄油。这些防水措施简单易行,效果都较好。导爆索多用在周边预裂



爆破中 ,以保证开挖规格和质量。

## 五、隧洞爆破技术措施






隧洞开挖目前仍广泛采用钻孔爆破法。应根据设计要求、地质情况、爆破材料及钻眼设备等条件 ,作好爆破设计。主要作好炮孔布置、确定装药量、选择爆破方法及起爆次序等工作。


### 1. 炮孔布置

布置在开挖面上的炮孔 ,按其作用不同分为掏槽孔、崩落孔和周边孔三种。

(1) 掏槽孔 掏槽孔布置在开挖面中心部位 ,首先爆出一个小的槽穴 ,其作用是增加爆破临空面 ,是提高周围炮孔的爆破效果。常见的掏槽孔布置方式有楔形掏槽孔、锥形掏槽孔和垂直掏槽孔等 ,其布置方式和适用条件见表 9-6。掏槽方式的选择 ,主要根据岩石性质、岩层构造、断面大小和钻爆方法等因素确定。

表 9-6 常见掏槽孔的布置简图和适用条件

掏槽形式	布置简图	适用条件
楔形掏槽	<div><div>(a)垂直楔形掏槽眼 (b)水平楔形掏槽眼</div></div>	适用于中等硬度的岩层。有水平层理时 ,采用水平楔形掏槽 ,有垂直层理时 ,采用垂直楔形掏槽 ,断面上有软弱带时 ,炮眼眼底宜沿软弱带布置。开挖断面的宽度或高度要保证斜眼能顺利钻进
锥形掏槽	<div><div>(a)三角锥掏槽眼 (b)四角锥掏槽眼 (c)圆锥掏槽眼</div></div>	适用于紧密的均质岩体。开挖断面的高度和宽度相差不大 ,并能保证斜眼顺利钻进

掏槽形式	布置简图	适用条件
垂直掏槽	 <p>(a)角柱掏槽 (b)直线裂缝掏槽</p>	适用于致密的均质岩体。开挖断面较小,斜眼钻进困难

开挖面上掏槽孔的数目,应在满足爆破的前提下力求最少,但不宜少于 2 个。炮孔方向应尽量与岩面的层面、节理、断层正交,以避免卡钻和爆破气体从层理面逸出。为了保证一次掘进的深度,通常要求掏槽孔比其它炮孔略深 15~20cm,为了保证掏槽的效果,掏槽孔的装药量应比崩落孔多 20% 左右。有时为了增加掏槽效果,在致密的均质岩体中或一次掘进深度较大的情况下,还可以在正规掏槽孔中心布置 2~4 个不装药的空心孔,其深度与正规的掏槽孔相同。

(2) 崩落孔:崩落孔的主要作用是爆落岩体,大致均匀地分布在掏槽孔外围,通常崩落孔与开挖断面垂直,孔底应落在同一平面上。

(3) 周边孔:周边孔的主要作用是控制开挖轮廓,布置在开挖断面四周。周边孔的孔口距开挖边线 10~20cm,以利钻孔。钻孔时应略向外倾斜,要求控制孔斜和孔深,使孔底落在同一平面上。孔底距设计边界的距离,视岩石强度而定,对于中硬石( $f > 4$ ),孔底可达设计边界;对于软石( $f \leq 2 \sim 4$ ),孔底可不用达到设计边界;对于极坚硬的岩石,孔底应超出设计边界 10~15cm。

上述周边炮孔爆破后,开挖面高低不平,超欠挖量很大,围岩爆破裂隙亦多。目前很多工程应用了光面爆破技术,可使周边整齐,围岩爆破裂隙较少,效果好。

图 9-45 为某隧洞炮孔布置图。导洞共布置了 17 个炮孔,其中 1~4 为掏槽孔,5、6 为崩落孔,7~17 为导洞周边孔。扩大部分共布置了 13 个炮孔,其中 18~23 是垂直孔担任掘进任务,24~30 是水平周边孔,主要是控制开挖边线。

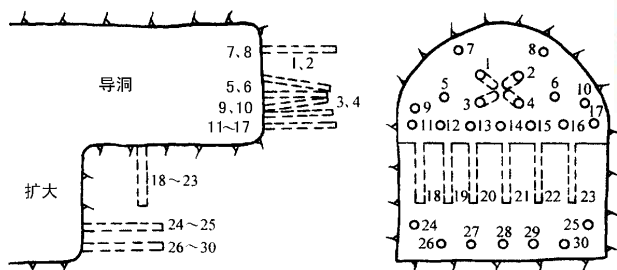


图 9-45 隧洞的炮眼布置示例

## 2. 装药量计算

在实际工程中, 用药量必须经过现场试验确定。施工前可按下列下式估算:

$$Q = KV = KLS\eta \quad (9-49)$$

$$K = 1.25 \sqrt{\frac{f}{S_1}}$$

式中:  $Q$ ——一次爆破中炸药用量  $\text{kg}$ ;

$K$ ——单位耗药量  $\text{kg}/\text{m}^3$  (可参考表 9-7);

$V$ ——一次爆破下来的岩石体积  $\text{m}^3$ ;

$L$ ——钻孔深度  $\text{m}$ ;

$S$ ——开挖断面面积  $\text{m}^2$ ;

$\eta$ ——炮孔利用系数, 一般取  $0.75 \sim 0.9$ ;

$f$ ——普氏岩石坚固系数;

$S_1$ ——导洞开挖断面面积  $\text{m}^2$ 。

表 9-7 隧洞开挖单位炸药( 2 号硝铵炸药 )消耗量( 单位 :kg/m<sup>3</sup> )

工 程 项 目		岩 石 类 别			
		软 石 ( $f < 4$ )	中 硬 石 ( $f = 4 \sim 10$ )	坚 硬 石 ( $f = 10 \sim 16$ )	特 硬 石 ( $f > 10$ )
导 洞	面积 4~6m <sup>2</sup>	1.50	1.80	2.30	2.30
	面积 7~9m <sup>2</sup>	1.30	1.60	2.00	2.50
	面积 10~12m <sup>2</sup>	1.20	1.50	1.80	2.25
扩 大		0.60	0.74	0.95	1.20
挖 底		0.52	0.62	0.79	1.00

3. 炮孔数目与深度

开挖断面上炮孔数目 ,很难用精确的理论公式计算。在实际工程中 ,往往是先根据经验公式初步估算出炮孔数目 ,然后结合具体工程进行现场试验。最后确实炮孔数目。初步计算可参照以下公式 :

$$N = \frac{Q}{lr} = \frac{ks}{r}$$

( 9-50 )

式中 : $r$ ——炮孔单位深度装药量 ,kg/m ,对于  $\phi 32\text{mm}$  药卷的 2 号岩石铵梯炸药为  $0.5 \sim 0.7\text{kg/m}$  ;

$l$ ——爆破后实际深度 ,m。

爆破深度可按下面经验公式计算 :

$$L = (0.5 \sim 0.7) B$$

( 9-51 )

式中 : $B$ ——导洞断面宽度 ,m。

## 第六节 爆破安全与防护技术

在爆破设计时,必须正确地估计爆破可能影响的范围。爆破可能造成的危害主要有爆破地震振动、爆破飞石、爆破冲击波、爆破毒气等。

### 一、爆破振动

表示爆破地震破坏的强弱程度称为振动强度。它可以用地面运动的各种物理量来表示,如质点振动速度、位移加速度和振动频率等。目前,大多数专家认为用质点振动速度来表示振动强度较合理。

大量实测资料证明,质点振动速度与爆破药量、测点至爆源的距离、地形、地质条件及爆破方式等因素有关,它可用下式表示:

$$v = K \left( \frac{Q^m}{R} \right) \quad (9-52)$$

式中  $v$ ——质点振动速度,  $\text{cm/s}$ ;

$Q$ ——装药量(齐发爆破时为总装药量,延时爆破为最大段装药量,  $\text{kg}$ ;

$R$ ——从测点到爆破中心的距离,  $\text{m}$ ;

$m$ ——装药量指数(国内一般采用值为  $\frac{1}{3}$ );

$K, \alpha$ ——与爆区地形、地质、爆破方式有关的系数(可以通过现场试验确定)。

葛洲坝工程爆破试验,施工获得的数据为:预裂爆破时,  $K = 92, \alpha = 1.17$ ; 群孔平地起爆时,  $K = 121.2, \alpha = 1.4$ ; 梯段爆破时,  $K = 48.1, \alpha = 0.89$ 。

原苏联萨道夫斯基公式与式(9-52)相同,其中  $K = K' / \sqrt{f(n)}$ ,  $K'$  值依介质情况而定,土质  $K' = 200$ ,岩石  $K' = 30 \sim 70$ 。 $f(n)$  为爆破指数,一般  $f(n) = 0.4 + 0.6n^3$ 。 $\alpha$  依距离远近而定,近距离时,  $\alpha = 2$ ,远距离时  $\alpha = 1.5$ 。

郎格福尔斯公式:

$$v = K \left[ \frac{\sqrt{Q}}{R^{3/2}} \right] \quad (9-53)$$

其中  $K$  值依岩石情况而定 ,瑞典坚硬岩石  $K$  值为 400。

由上可以看出 ,与振动速度有关的主要因素有 :

(1)介质的特性。被地质构造(断层、节理、裂隙等)分割成具有不同弹性、塑性的地区 ,同一地区不同的部位 ,对振动衰减和传播影响也有差异。

(2)药包形式对振动波的传播影响。在全弹性无限介质中 ,球状药包产生球面波 ,波阵面面积与距离的平方成正比 ,单位阵面面积的能通量与距离的平方成反比。柱状药包产生柱状波 ,波阵面面积与距离成正比 ,能通量与距离成反比。

表 9-8 和表 9-9 为国内外各工程采用的振动速度的限定值、实测值 ,或建议的振动速度。

表 9-8 国内外某些工程振动标准

工 程	质点速度 (cm/s)	建筑物或岩石	备 注
葛洲坝坝基	13.0	粉砂岩 粘土质粉砂岩	限定值
香山坝	2.17	砌石重力拱坝顶部	实测值
	1.75	砌石重力拱坝坝内	实测值
白山电站	16.6	前震旦纪混合岩	限定值
	17.3	地下厂房边墙	实测值
陡山河坝	20.0	粗粒花岗岩	限定值
黑武士河船闸	10.0	船闸基础砂页岩互层	限定值
藤井川坝	2.5	混凝土坝体部分拆除	限定值
新中野坝	10	混凝土坝体部分拆除	限定值
休德代巴斯	15	混凝土坝顶	实测值
	4.5	混凝土坝基	实测值

表 9-9 国内外工程爆破震动对建筑物的影响

名 称	振 动 速 度 (cm/s)	建 筑 物 特 征	破 坏 情 况
阳逻船厂	2.68~5.2 >27.3	砖瓦房仓库、 办公楼砖砌变电房	未发现破坏 严重破坏
官厅水库	13.4 28.04	砖墙、钢筋混凝土顶平房 砖墙、钢筋混凝土顶平房	原有裂隙稍有扩大和延伸 产生新裂缝、顶盖与砖墙错位
铜山口铜矿	<31.8	工业厂房,民用砖房	新砖房未发现裂缝, 年久砖房落砖掉瓦
某矿	17.5~21	三屋办公楼 矿山宿舍	无破坏 墙与层面开裂,山墙错位
狮子山大爆破	6~10	砖房和土坯房	裂缝
石砭峪定向爆破	10.45	观测掩体	顶部掉块,裂缝张开
密云水库	3.23~5.68	溢洪道闸门启闭机房	顶棚一处掉灰,其他无破坏
首钢迁安矿	1.21	砾石黄土砌墙	房屋裂缝有向、爆区倾斜迹象
清河水库	26.2 9.6	长石石英片岩、闪长岩 长石石英片岩、闪长岩	岩基露头出现裂缝 未见破坏
310 工程岩塞爆破	7.0	片麻岩露头	未破坏
陡山河岩塞爆破	20 75	花岗岩露头 花岗岩露头	未破坏 原有裂缝张开
密云岩塞爆破	11.5	片麻岩、辉灵岩	未破坏
东江水电站	45.3	裂缝中等发育的花岗岩	基岩产生小裂缝

爆破产生的地震振动,在爆区附近较大,随着爆破中心距离的增大、振动就逐渐减小。对于不同的建筑物或保护对象,允许的振动速度是不同的,其安全距离亦不相同。由公式(9-52)所得出安全距离  $R$  为

$$R_{\text{安全}} = \left( \frac{K}{v_{\text{安全}}} \right)^{1/2} Q^m \tag{9-54}$$

当依据建筑物的特性定出质点振动速度  $v$  和已知药量  $Q$  后,即可确定安全距离  $R$ 。此时,应首先通过试验定出  $K, \alpha, m$  值。

爆破安全标准目前还没有明确的规定,各工程采用标准各不相同,例如,美



国黑武士河船闸增建时 ,为了不破坏原船闸结构 ,对砂岩互层闸基的极限振动速度定为 20cm/s ,限定的振动速度为 10cm/s ,安全系数为 2。日本新中野混凝土坝改建时需拆除混凝土坝的一部分 ,计算的极限振动速度为 13.4cm/s ,而限定值为 10cm/s ,其安全系数为 1.34。同样情况 ,藤井川混凝土部分拆除时 ,极限振动速度为 40cm/s ,限定值仅用 2.5cm/s ,安全系数达 16。

原苏联常用于房屋建筑( 砖石结构 )的经验公式 ,地震安全距离  $R$  为

$$R = K\alpha \sqrt[3]{Q} \tag{9-55}$$

式中  $K$ ——被保护建筑物基础土岩特性系数( 见表 9-10 );  
 $\alpha$ ——依据爆破指数而定的系数( 见表 9-11 );  
 $Q$ ——一次起爆药量 ,kg。

表 9-10 基础土岩特性系数  $K$

基础土岩特性	$K$
坚硬密实岩石	3.0
硬碎岩石	5.0
砾石、碎石土类	7.0
砂土	8.0
粘土	9.0
填筑土类	15.0
混合土( 粉土和淤泥 )	20.0

表 9-11 与爆破指数有关的系数  $\alpha$

爆破条件	爆破指数( $n = \gamma / W$ )	$\alpha$
药壶爆破	0.5	1.2
正常爆破	1.0	1.0
加强抛掷	2.0	0.8
加强抛掷	3.0	0.7

对于重要的和复杂的水工建筑物 ,原苏联常用的公式有

$$R = \left[ \frac{\sqrt[3]{Q}}{\left( \frac{v_k K_1}{K_2} \right)^{\beta/3}} \right]$$

( 9 - 56 )

式中  $v_k$ ——建筑物的极限振动速度  $\text{cm/s}$  ;  
 $K_1$ ——系数( 依据建筑物基础和爆破条件而定( 见表 9 - 12 ) );  
 $K_2$ ——岩石裂隙影响系数( 见表 9 - 13 ) ;  
 $\beta$ ——指数( 依据爆破至保护物的距离而定 ,当建筑物在爆破地点  $100d$  以内的地面上 ,或者在  $50d$  以内的地下时 , $\beta$  值采用  $1.0 \sim 1.5$  ,距离更大时 , $\beta$  采用  $1.5 \sim 2.0$  。  $d$  为药包直径。 )

表 9 - 12 爆破条件系数  $K_1$

爆 破 条 件	$K_1$
料场松动爆破 ,建筑物在地表	1.0
地下爆破	1.5 ~ 3.0
抛掷爆破	1.5 ~ 2.0
一个自由面的松动爆破	0.7 ~ 0.8

表 9 - 13 岩石裂隙影响系数  $K_2$

岩石裂隙等级	$K_2$
I	500
II	300
III	200
IV	100
V	50

以上式中的炸药量  $Q$  ,当为梯段爆破时 ,应换算为等效爆破药量  $Q_{\text{效}}$ 。

$$Q_{\text{效}} = 1.6R \frac{Q}{L} \quad (9-57)$$

式中  $L$ ——爆破前缘长度  $\text{m}$  ;

$Q$ ——总药量  $\text{kg}$  ;

$R$ ——建筑物至爆破点距离  $\text{m}$ 。

在梯段孔排爆破或距爆破处不太远时 ,则可能承受平面波 ,其安全距离  $R$  为

$$R = \left[ \frac{1.85K}{nv_k} \right]^{3/2} \frac{q}{a} \quad (9-58)$$

式中  $K$ ——爆破地震特性系数(  $K = 150 \sim 250$  ) ;

$n$ ——屏蔽系数 [有屏蔽(预裂缝、断层裂缝等)时 , $n = 2 \sim 3$  ,无屏蔽时 , $n = 1.0$  ] ;

$q$ ——每米钻孔药量  $\text{kg/m}$  ;

$a$ ——钻孔间距  $\text{m}$ 。

为了降低爆破振动对周围建筑物的影响 ,可以采取下列降低爆破振动的措施。①严格控制岩石开挖的爆破方式 ,除必要的掏槽爆破外 ,基坑岩石开挖应采用毫秒梯段爆破方式 ,减小岩石的夹制作用。②采用多段孔间微差爆破网络 ,将单段最大药量减小至允许范围内。③合理选择爆破参数和单体积耗药量。④在地质条件合适时 ,采用预裂爆破将保留区与开挖区分开 ,且严格控制预裂爆破单段药量。

## 二、爆破冲击波及其处理技术

土岩开挖爆破以及建筑物拆除爆破 ,均产生空气冲击波。特别是裸露爆破时 ,冲击波更为强烈 ,影响距离更大 ,空气冲击波与地震振动一样也危及建筑物安全 ,轻者门窗被损 ,重者房屋倒塌 ,在居民住宅区爆破时应特别注意。

对建筑物或人 ,爆破的安全距离可用下式估算 :

$$R = K \sqrt[3]{Q} \quad (9-59)$$

梯段爆破时 ,空气冲击波衰减快 ,破坏强度较弱 ,对人员伤害主要表现在听觉上。露天裸露爆破 ,空气冲击波强 ,为了防止空气冲击波对在掩体内避炮作业人员的伤害 ,取  $K = 25$  ,并控制装药量  $Q$  (定义同前 )不得超过 20kg。

对于房屋建筑物则按表 9－14 选用  $K$  值。

表 9－14 冲击波安全程度系数  $K$

安全等级	可 能 破 坏 情 况	炸 药 爆 炸 情 况			
		外部药包	孔穴内	$n = 3$	$n = 2$
1	无损失	50～150	10～50	5～10	2～5
2	玻璃设备偶然被破坏	20～30	10～15	2～4	1～2
3	玻璃全破 ,门窗局部被破坏 ,抹灰脱落	6～8	3～5	1.0～1.5	0.5～1.0
4	内隔墙被破坏 ,门窗、木板房被破坏	3～4	1.5～2.0	0.5～1.0	
5	坚固房屋被破坏 ,车辆倾覆 ,电线被破坏	1.5～2	0.5～1	—	
6	城市房屋、桥梁路基被破坏	1.5	—	—	—

美国矿务局提出的空气冲击波压力  $P$  为

$$P = 175 ( R / Q^{1/2} )^{-1.4} \tag{9-60}$$

矿务局的安全标准为 128dB 或 6.0071B/英寸<sup>3</sup>。

Hoek 和 Brav 的标准为：

- 140dB 或 2.1hPa ,不造成破坏；
- 149dB 或 7.0hPa ,有些玻璃破碎；
- 160dB 或 70.0hPa ,大多数窗玻璃破碎；
- 180dB 或 211hPa ,建筑物被破坏。

水下爆破时冲击波按库尔公式为

$$P = 533 ( Q^{1/3} / R )^{1.13} \tag{9-61}$$

该公式用于计算水中爆破时冲击波的压力 ,当钻孔爆破时 ,一部分能量损失于破碎岩石上 ,考虑孔口覆盖不密实 ,广州航道局提出爆压为

$$P = 200 ( Q^{1/3} / R )^{1.13} \tag{9-62}$$

水中爆破冲击波比陆上爆破大得多 ,其衰减也要慢得多。同样水中爆破引

起的质点振动速度也衰减很慢。某试验所得的水下钻孔爆破和陆上钻孔爆破质点振动速度变化的经验公式如下：

$$v_{\text{水}} = 25.3 (R/Q^{1/3})^{-0.58} \quad (9-63)$$

$$v_{\text{陆}} = 136 (R/Q^{1/3})^{-1.6} \quad (9-64)$$

可看出,当  $PQ^{-1/3} < 5$  时,陆上振速比水下的稍大;当  $RQ^{-1/3} = 5$  时,两者差不多相同;当  $RQ^{-1/3} > 5$  时,则陆上振速比水下小得多。在水下爆破时,要慎重考虑壅水建筑物和船只的安全。

减少冲击波的主要技术措施有:①要有正确的爆破设计,堵塞长度和抵抗线不能太小,应有适当值。②爆破岩体如漏气或存在软弱夹泥层等应进行处理。③尽量使爆破方向不朝向建筑物。④天气阴湿、有雾时应特别注意。

### 三、个别飞石处理技术

个别飞石指超出主爆堆以外的单个或若干个大小不等的岩块。造成飞石的原因一般是地质情况不明或因设计、施工的错误等。个别飞石的飞散距离与爆破参数、堵塞质量、地形、地质构造及风力、风向因素有关。一般爆破个别飞石范围可按常用的经验公式确定。

$$R_F = 20n^2WK_F$$

式中:  $R_F$ ——飞石对人员的安全距离 m;

$n$ ——爆炸作用指数;

$W$ ——最大一个药包的最小抵抗线 m;

$K_F$ ——安全系数,通常可取 1.0~1.5;风大或顺风时可取 1.5~2.0,或更大些;当抛掷方向正对最小抵抗线时,应取 1.5;对于山谷或垭口地形应取 1.5~2.0。

对于机械设备,按上式计算值减半。

一般抛掷爆破的个别飞石范围也可参考表 9-15 确定。

表 9-15 抛掷爆破个别碎石飞散的安全距离(单位:m)

最小抵抗线/m	对于人员					对于机械				
	爆破作用指数 $n$					爆破作用指数 $n$				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
1.5	200	300	350	400	400	100	150	250	300	300
4.0	300	500	700	800	800	150	250	500	550	550
8.0	400	600	800	1000	1000	200	350	600	700	700
12.0	500	700	900	1200	1200	250	400	700	800	800
20.0	700	800	1200	1500	1500	350	400	800	1000	1000

注 : $n < 1$  时 ,将最大药室的最小抵抗线  $W$  换成相当于抛掷爆破的最小抵抗线  $W_P$ 、 $W_p = \frac{5}{7} W$  ,再根据  $n = 1$  条件按本表查得碎石飞散安全距离。

#### 四、爆破毒气

由于露天爆破药量较大 ,爆破后将产生大量毒气。如二氧化氮(  $\text{NO}_2$  )、一氧化碳(  $\text{CO}$  )、二氧化硫(  $\text{SO}_2$  )等。特别是进行较大的露天抛掷爆破 ,应考虑瞬间有毒气体的危害。其危害范围与气象、地形、布药情况、炸药质量与总装药量有关。

爆破毒气影响范围按下式计算

$$R_g = K_g \sqrt[3]{Q} \tag{9-65}$$

式中：  $R_g$ ——爆破毒气扩散安全距离 m；

$Q$ ——总装药量 t；

$K_g$ ——系数 ,根据统计资料平均为 160。

对于下风向 ,安全距离应增大 1.0 倍。

## 第七节 爆破检测与观测方法

水电站建设爆破检测与观测方面常采用以下方法：

(1) 基岩破坏范围的检测主要有：声波法、压水及注水法、钻孔取岩芯及孔内电视观测、宏观破坏调查；

(2) 水下爆破检测：水击波及动水压力检测、爆破涌浪观测；

(3) 爆破动态过程检测：岩石运动过程的高速摄影观测、爆破振动检测、爆破空气冲击波测量。

水下爆破的检测工作是必须进行的。坝基开挖施工中，声波法、爆破振动检测等项是经常采用的检测方法，其他方法多用于爆破试验。

### 一、基岩破坏范围检测

基岩破坏的检测，常用于爆破试验和坝基最后的质量检查。声波法是最常用的检测方法。爆破试验还运用测量应力与应变、压水或注水、钻孔取岩芯及孔内电视检查等方法。

基岩破坏检测将决定以下事项：坝基验收检查、深孔梯段爆破或其他爆破造成岩体松弛范围（深度）的检查、裂缝的分布情况等。

岩基破坏检测方法，以声波法最简便，压水试验最符合水工特点，裂缝调查、钻孔取岩芯及孔内电视检查最直观。

声波法是通过测定岩体内爆破前后声波速度、振幅、频率等的变化来判断岩体受爆破作用后的破坏程度。目前以岩体声波速度作为判据得到广泛应用，并积累了较为丰富的经验，虽然声波速度变化还不能描述裂缝变化及增生的状况，但却已被设计部门认可并经受许多工程的检验。SL47-94 规范明确提出检查基岩质量宜用弹性波纵波法进行观测，并在附录 A 中提出它的控制标准。声波测试现行的方法主要是：

(1) 对穿法：在测区钻发射与接收孔，可以是一发一收，也可以一发二收，今后还可向一发多收方向改进。

(2) 同孔法：发射器及接收器同时放在一个孔内，主要检查孔壁周围的破坏



情况。

(3)地震剖面法 利用声波折射原理 测量基岩表面松弛层厚度。

声波测量仪器 主要为声波岩石参数仪 其中以 SYC 型使用较多 ,也可用电火花仪配记忆示波器测量 后者记录线数 表示可接收的点数。

其他方法检测基岩破坏范围见表 9－16。

表 9－16 部分基岩破坏范围检测法及其控制标准

观测方法	基本原则	划分破坏范围标准	
压水试验	岩体内部裂隙和层面扩大 ,渗透量将产生变化 ,爆后漏水量增大	爆前漏水量	爆破前后漏水量 相对变化率
		1L/min 1～10L/min 大于 10L/min 0	大于 ± 30 % 大于 ± 10 % 大于 ± 5 % 大于 0.01L/min
岩芯鉴定 及深孔电 视检查	爆破破坏区的岩石出现高倾角裂隙 ,岩芯获得率及其形状与爆前明显不同	1. 爆后岩芯获得率小于 70 % ; 2. 用裂隙调查方法在岩芯上确定高倾角裂隙出现的深度 ; 3. 用深孔电视在孔壁上确定爆破裂隙的深度	
层面张开 和 错 动 , 地表裂隙 调查	岩层软硬不一致 ,层面胶结不好。爆破作用后 ,岩层间有相对变形 ,层面产生错动或有张开现象。地表裂缝有张开和延长现象 ,或者产生新裂缝	软弱层错动大于 ± 0.1mm。 地表质点振动速度大于 13cm/s ,发生左侧 所举现象	

二、水下爆破检测方法

水电站建设中岩塞爆破、围堰拆除、三峡工程风化砂围堰爆破压实试验以及在水工建筑物附近的水下基岩开挖等做过水下爆破检测。水下爆破水击波、动水压力、振动及涌浪等是检测主要内容。我国在丰满水电站岩塞爆破、葛洲坝水电站大江围堰拆除爆破中曾组织上百台记录设备进行全面的观测工作 ,其内容除上述项目外 ,还有高速摄影等。在汾河水库、密云水库和河南香山水库等岩塞

爆破时,也曾组成很强的观测力量进行水中及坝体建筑物的观测工作。

水下爆破的最大优点,在于爆炸(或水下岩体的爆破)在水中的传播作用,以及通过水的作用再传至陆地或建筑物后所显示的特点。水击波的频率高,通过水再作用到陆地与建筑物上,同样表现出高频振动的特征,假如水击波衰变成动水压力,再作用到地面或建筑物上,其频率要比前述低得多,并与在陆地进行爆破引起的振动近似。

水下爆炸压实属于另一种问题,它利用水的不可压缩性,可以传递高压将水中块体、砂等压密。

水下爆破的测量主要是水击波测量,振动测量与陆地相同,差别主要是频率较高。水击波测量在我国主要用压电陶瓷切片做的传感器配瞬态记录仪进行,测量系统的频率要求很高,频率特性的上限要求达到 100 万 Hz 以上。

### 三、爆破动态过程检测技术措施

岩石运动过程的高速摄影测量,对研究梯段爆破岩的表面作用过程以及被爆岩体破碎后的抛掷运行过程有着重要作用。上述过程的测量,所需要的画面幅频并不高,每秒 300~1000 个幅面即可满足,施工中很少做这种测试,完成这一检测需使用高速摄影机或高速摄像机(配有时标装置)。

梯段爆破时,只要前排抵抗线选择得当及堵塞满足(0.7~1.0m)抵抗线的要求,空气冲击波的作用可以不予考虑。当地表铺设大量导爆索时,空气冲击波对周围的影响需进行考虑,而后者在网络设计时应力求避免。

以下重点论述爆破的振动作用及其危害。水电站建设中爆破对建筑物、结构物以及机械设备的影响是经常遇到的课题,每一个爆破工作者必须具有建筑物等抗爆振的知识、能力及制定减少爆振的爆破方案的能力。

#### 1. 爆破振动判据

采用何种物理量描述爆破造成建筑物、结构物等的破坏程度,一直是全世界爆破工作者关注的主要问题之一。20 世纪 70 年代以前,从大量测试资料统计发现,用质点振动速度作判据较之位移和加速度与实际破坏状况更相吻合。所以许多国家,包括我国的规程、规范中都以它制定控制标准,它是以振动的某一方向的最大幅值为依据制定的。

爆破振动引起建筑物和结构物的破坏是一个复杂的问题。它应包含两方面

的内容:一是爆破振动的动力特点,其中频率、幅值、作用时间、频谱特性等是主要的特征参数;二是建筑物或结构物对爆破振动的反应,它与结构设计、材料、施工质量和场地条件等因素有关。由此可见,采用单一的振动量来判断建筑物或结构物的破坏是不全面的,甚至是片面的。按上述两个方面的原因来分析它们的破坏,应当是合理的。但上述两方面中诸多因素是复杂的、变化的,以致于一个建筑物一个样。针对以上情况,目前对爆破振动研究的发展趋势是:首先,建立一个简单、便于控制,又可将绝大多数建筑物或结构物控制在安全范围的标准。在影响爆破振动作用的诸因素中,频率是一个重要因素,因为建筑物和结构物对于低频与高频振动的反应有很大的差异,所以一些国家将质点振动速度的标准按频率的不同划分二至三个范围,即不同频率范围,质点振速幅值不同。其次,根据重点建筑物做重点研究和计算,以确定出合理结构反应,判定它的安全程度。随着计算技术的发展,当能很快计算出爆破振动对建筑物的反应之后,便能确定它的安全度,那时,爆破振动的影响将会在更符合实际情况的理论与计算指导下,做出合理结论。

## 2. 质点振动速度传播规律的经验公式

质点振动速度的控制标准在 GB6722—86《爆破安全规程》中有一些规定,对于水工建筑物而言,大部分建筑物与结构物在上述规程及 SL47—94《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》中都未做出规定,必须由设计者或施工者参照一些经验制定控制标准。

SL47—94 规范提出的经验公式为

$$v = K \left( \frac{W^{1/3}}{D} \right) \alpha \left( \frac{W^{1/3}}{H} \right) \beta \quad (9-66)$$

式中:  $v$ ——质点振动速度,  $\text{cm/s}$ ;

$W$ ——爆破装药量,齐发爆破时取总装药量,分段微差爆破时视具体条件取有关段或最大一段的装药量,  $\text{kg}$ ;

$D$ 、 $H$ ——分别为爆区药量分布的几何中心至观测点或建筑物、防护目标的水平距离和高程差,  $\text{m}$ ;

$K$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ ——与场地条件、岩体特性、爆破条件,以及爆区与观测点或建筑物、防护目标相对位置等有关的常数,由爆破试验确定。

式(9-66)使用的场地如没有明显高差,则不需考虑 $(\frac{W^{1/3}}{H})^\beta$ 项。此量 $K$ 、 $\alpha$ 值在GB6722-86规程中提供了不同岩石条件的取值范围。

$K$ 、 $\alpha$ 值与场地条件(地形与地质)差别很大,甚至同一地区,重复爆破都不能取得相同值。因此,爆破试验时应尽可能多测取数据,以便得到符合该地区的实际值。

### 3. 测量仪器与方法

测量仪器的组成为拾震器、放大器、记录器。

我国现有的拾震器(尤其是速度传感器)与国际水平还有相当差距,体积大、频带窄是其最大的缺点,尤其用于深孔梯段爆破振动测量,问题较多。

爆破自记仪的使用,减小了长导线,使测量方法大大改进,同时在数据处理上与微机连接,应用更为方便。它为爆破振动测量和监测进入更高水平创造了条件。