



工程爆破概论

霍永基

(1983年2月28日收到)

一、前 言

黑火药是我国古代四大发明之一。我国炼丹家孙思邈在其所著的《丹经》中即有记述。唐、宋朝间，黑火药已应用于民间娱乐和军事作战。直到十三世纪初叶，黑火药始传入阿拉伯，最先在阿·艾勒 (*Abd Allah*) 的著作中称之为“中国雪”。随后辗转传入欧洲。1548~1572年间俄国首先用于开拓聂曼河航道，1627年匈牙利人则首先用于采矿爆破。1867年诺贝尔 (*Alfred Nobel*) 发明了黄色炸药 (硝化甘油)，雷管以及随着凿岩机具的出现，开创了近代工程爆破技术发展的新纪元，在工程中得到了广泛的应用。例如，1885年美国修建东河运河 (*East River Channel*) 中，曾用硝化甘油一次装药 140 多吨进行爆破。苏联在二十世纪三十年代为了打开通往褐煤矿床的通道，一次爆破装药量达 1808 吨。新中国诞生后，工程爆破技术发展很快，五十年代初期开始采用深孔爆破和硐室大爆破。1956年白银厂铜矿一次爆破的炸药量达 9600 吨。此外在铁道和水利水电建设中亦得到了广泛的应用。1960年修建南水水电站中一次用炸药 1394 吨进行定向爆破筑高坝成功。上述工程实践标志着我国工程爆破技术进入了世界先进行列。

目前爆破技术正朝着规模大、控制好和精确化的方向继续发展。不但普遍用于冶金矿山、水利水电、铁道、交通、煤炭、石油、建工、建材各部门的大量开挖、填筑、采掘、水下疏浚、压密加固以及建筑结构拆除等方面，而且在农林部门和耕地整治中用于打井，深翻土地，移山造田方面，甚至在医疗卫生上成功地用于膀胱结石的微量精细的爆破清除。因此，爆破技术对于加快工程建设，提高经济效益，促进国民经济发展，实现2000年我国工农业总产值翻两番的宏伟目标将起到十分重要的作用。可见工程爆破有着丰富的内容和巨大的生命力。概括起来工程爆破主要包括以下基本内容：炸药和起爆技术；岩体爆破机理；各类控制爆破技术；爆破公害和安全标准。

二、炸药和起爆技术

1. 常用炸药的种类及其性能

硝酸类炸药是目前国内外生产最多使用最广的工业炸药。它以硝酸铵作为主体，加入 3~14% 左右的梯恩梯作为敏化剂以及 4~9% 木粉为疏松剂等制成各种型号 (包括露天、井下、抗水和高威力等) 的铵梯炸药。它具有爆破威力较高，使用安全等优点。但防水性差，易吸湿结块，可用于

中硬以上岩石的爆破。施工中常用的二号岩石硝酸铵炸药即属此类。为了提高炸药的抗水性能,在此基础上加入少量的松香和石蜡之类的憎水性和表面活性的物质即为铵松蜡炸药。另外,以硝酸铵为主加入2~6%轻柴油(或再加入适量的木粉)制成的铵油炸药,于1956年首先在美国使用,在六十年代期间基本上取代了硝化甘油而用于干孔中的爆破作业。它具有爆破威力大,原料来源广、加工简便、成本低廉、生产运输和使用均较安全等优点。因此我国许多大规模爆破工程(如冶金矿山万吨级剥离爆破和石砭峪水库1600吨定向爆破筑坝等)中使用,效果良好。铵油炸药的主要缺点是吸潮结块怕水,不能用于有水的硐室和爆破工作面。浆状炸药则是将硝酸铵溶于水,加入少量梯恩梯,硝化甘油、铝粉或镁粉之类的敏化剂和田菁胶等胶结剂制成。它具有较好的抗水抗冻性能。特别应该提到的是水胶炸药,它主要由甲基铵硝酸盐(约占1/2)、硝酸铵(约占1/3)、硝酸钠和少量的粘胶剂、交联剂和泡沫稳定剂等分别溶解于水后,按一定次序混合而成。储存于罐内再用泵根据需要装入一定规格的塑料薄膜管内,制成不同直径和长度的药卷或直接灌于炮孔内使用。水胶炸药具有使用运输安全、毒性少、抗水性强、爆破威力大,可以调节密度适应各种爆破介质特性需要等优点。因此自1957年美国杜邦公司首先制成使用后,1978年水胶炸药用量已占美国标准炸药用量的2/3,现已在加拿大、瑞典、日本、法国、澳大利亚等国广泛使用。近年来我国亦正研制使用,这是一种很有发展前途的工业炸药。

此外,胶质炸药是以硝化甘油、二硝化乙二醇和硝酸钾(钠)为主,加入少量吸水剂硝化棉和疏松剂木粉制成的一种半透明的可塑性炸药。它具有很高的爆炸威力,且不溶于水,能耐冻,但易挥发和老化而失效,敏感性极强,安全性差,制造、运输和保管条件比较困难。因此除用于特种爆炸和水中爆炸外,一般很少使用。

梯恩梯炸药(三硝基甲苯)具有爆炸威力大,安全性好,吸湿性很小,几乎不溶于水,可用于水中爆炸。它较胶质炸药安全而兼有其优点,但因成本较高,一般仅用作加强起爆药或作为铵类炸药的敏化剂外,在工程爆破中很少单独使用。

2. 起爆技术

工业炸药必须受到强大的外能作用下,由于局部的温度骤升而形成灼热核后,始能从爆燃转化为爆轰,而且只有具备稳定爆轰条件时才能引爆全部炸药。因此工程爆破起爆技术通常采用各种起爆器材并由此而组成的点火,传导和起爆系统来实施。常用的起爆器材有:

雷管——用以直接引爆炸药或其它起爆材料的最主要起爆器材。根据不同用途分火雷管、非电毫秒雷管和电雷管。后者又分为瞬发、秒延期和毫秒延期电雷管。此外尚有抗杂散电流、抗静电、抗高温和防瓦斯电雷管等。

导火索——用火点燃后传递火焰以引爆火雷管和黑火药的索状点火器材。

导爆索——受雷管激发后传递爆轰波以引爆炸药(或起爆体)之用。

继爆管——用作延期激发导爆索传爆达到分导延期起爆目的的器材。

导爆管——是瑞典于七十年代初期首创的最新产品。它是在细塑料管(内径为1.4毫米)内壁涂以薄层混合炸药制成。利用炸药爆炸的管道效应,当一端受激发后管内炸药以1700~2000米/秒的速度稳定地传播而无声、光、热之感,与联结元件结合可作延期爆破之用的起爆器材。

利用上述起爆器材组成相互连接的体系,以达到安全可靠地按顺序和时间要求准确引爆所有炸药的体系称为起爆系统。工程爆破中常用的起爆系统有如下几种:

(1) 火花起爆系统——是一种古老的常用起爆系统,它包括:

火源(点火材料)+导火索+火雷管

该系统比较简单,多用于非齐爆的钻眼爆破,其缺点是起爆系统故障无法检查,一次爆破孔数有限,容易引起带炮、瞎炮,不够安全可靠。

(2) 电力起爆系统—常用于群孔齐爆,大量硐室爆破和秒差或毫秒延期爆破。其优点是网路故障较易检查,起爆孔数不限,起爆时间控制准确,缺点是网路复杂,成本高,受雷电和杂散电流感应误爆威胁,需要足够的交、直流起爆电源,使用不便。该系统的典型构成为:

交、直流电源(含起爆器)+金属导线+电雷管(起爆体)

(3) 非电导爆起爆系统—它可以克服以上两种起爆系统的缺点,是今后发展的主要方向。这类起爆系统实际上包括两种型式:

A. 导爆索起爆系统:其构成为火(电)雷管激发导爆索,通过导爆索来引爆炸药或起爆体,或者中间串联继爆管达到多道延期控制爆破作用。即

激发雷管+导爆索+(继爆管+导爆索)+(起爆体)

其优点为可避免电力起爆系统的固有缺点,但易出现网路故障而无法检查和成本较高的缺点。

B. 导爆管起爆系统:它兼有上述各种系统的优点而其缺点又较少,该系统包括:

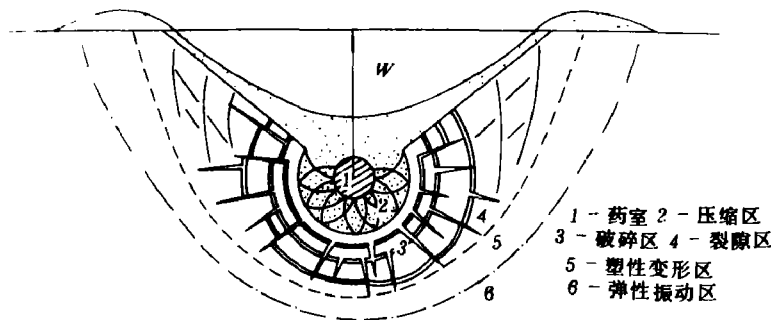
激发装置+导爆管+(联结元件+导爆管)+雷管(起爆体)

这是起爆技术的重大革新,是目前发展的主要方向,值得大力推广使用。

最后应该指出,对于大规模的重要工程爆破,为了确保安全准爆往往采用复式起爆系统,即采用电力起爆系统外,另加一套非电导爆起爆系统。

三、岩体爆破机理

炸药在岩体内部爆炸时,爆轰产物以高温高压气体的形式(温度约摄氏几千度,压力达数十万大气压,与炸药性质、规模和爆破条件有关)对周围介质施加强烈的冲击和压缩作用,这一爆炸能使岩体内激发起一组复杂的波系自爆心向外传播。由于爆炸气体的压力远远高于介质的强度(岩石的抗压强度约为 10^3 公斤/厘米²量级),故炸药周围的岩体被挤压和剪切作用而成为粉碎,甚至产生流动状态,出现一个高变形区,通常称之为压缩区。随着距离的增加,冲击波阵面的压强急激下降,但仍大于介质的抗压强度,岩体仍将被压破,同时由于介质受球对称(集中药包)或轴对称(柱状药包)压缩产生向外动运和变形而引起切向拉伸,因而出现一组辐射状的裂隙向外延伸。随着距离进一步增加,冲击波阵面压力进一步迅速下降,并衰减为应力波的形式继续往外传播,当波阵面压力超过介质的弹性极限,便出现弹塑性区并产生永久变形。随后由于波阵面的压强小于介质的弹性极限,便以弹性波的形式向外传播而不发生残余变形。如果炸药埋深不很大,则爆炸压缩波到达自由面时即产生拉伸波反向传播。由于岩石的抗拉强度远低于抗压强度(一般仅为 $1/10$ 左右),因此拉伸波造成反弧状的一组新裂隙或使已有的微裂隙扩张,乃至使岩块剥落而产生飞块,从而增加了爆破的效果和扩大了裂缝区的范围。与此同时,爆炸生成的高压气体不断膨胀做功和挤进原有裂隙起到楔入作用,使周围岩石进一步破碎并向自由面方向产生抛掷作用。另一方面随着爆炸气体的膨胀和在岩体裂隙中散失,导致爆心超压急激下降,于是产生卸载波尾随压力波往外传播,从而产生一组环向裂隙,整个爆破图象十分复杂。最终形成的爆破漏斗和破坏区域如图(1)示。



图(1) 爆破作用区域示意图

由此可见,爆破作用是极其复杂的动力过程,目前关于岩体爆破作用的冲击波理论和气体膨胀理论均有其局限性,它们都仅从某一因素去解释爆破机制,而忽略了另一因素的作用。众所周知,炸药爆轰波的传播速度一般为4000—5000米/秒左右,视炸药品种和密度而定。所以即使硃室爆破,炸药爆轰波的时间均属微秒量级,故可看做瞬间反应。而岩体冲击波的传播速度一般为2000—5000米/秒,视岩性而定。若考虑冲击波或应力波往返传播的历程,其作用时间约为毫秒量级。但是,爆轰产物气体的作用时间将随着最小抵抗线的增加而增长,根据某些高速摄影资料分析表明,对于深孔爆破,约为 10^{-4} 秒量级;对于硃室大爆破,则达秒量级。所以许多情况都必须用两者相统一的理论去解释。

因此,我们可以根据爆破作用原理,针对不同岩体的物理力学性质和工程爆破的目的和要求,有可能通过选用不同炸药品种、密度和装药结构(耦合或不耦合装药)等办法来控制,爆破冲击波参数和爆轰气体的作用时间,以提高炸药的有效利用能量,改善爆破效果。

四、工程爆破的类别和用途

工程爆破指为达到各种工程的兴建,改建、扩建和正常运用需要而进行的爆破作业。因此内容较广。根据工程爆破的性质和任务,可简略分述于后:

(1) 开挖爆破。基本建设往往需要完成大量的土石方开挖任务,例如:厂房基础开挖,铁路和公路路基开挖,露天矿复盖层的剥离,以及地下工程掘进开挖,等等。上述任务除个别可用特殊的机械施工外,大都采用爆破方法来完成。近代开挖爆破技术的特点之一,是普遍采用控制爆破技术——予裂爆破和光面爆破等。予裂爆破(Preshearing Blasting)是沿开挖边线打一排间距较近的钻孔。孔径一般与主体开挖时孔径相同(工程上一般采用5.0~10.0厘米),孔中药卷直径一般为2.0~2.5厘米,孔内可采用连续装药或间隔装药,不耦合系数(即孔径与药径之比)约为2~4之间(亦有采用隔孔装药者,不装药孔作为导向孔)。这些孔是在所有邻近开挖区中的任一炮孔之前引爆,用毫秒控制爆破技术实施。予裂孔的间距与现场条件有关,需要试验确定,予裂孔的作用为当两个邻近的炮孔中封闭的炸药爆炸时,由于冲击波的迭加,使两孔间的岩石受到拉伸而形成破裂面,以减少主体开挖爆破可能对周围岩体的破坏影响以及消除可能造成的超挖和欠挖,同时还可以起到隔震和减震的作用。

光面爆破(Smooth Blasting)的做法与予裂爆破相似,其不同者为排孔爆破的顺序相反,即开挖边线孔在邻近主体开挖孔爆破完成后起爆,亦用毫秒雷管控制。以达到最终开挖面平整确保围岩的完整性,减少以及免除衬砌工作量。为此亦有在开挖边线孔中药卷与孔壁之间填以粗砂或碎石作为缓冲层,以避免孔壁围岩出现裂缝者,称为缓冲爆破(Cushion Blasting)。此外有时为了严格保证开挖轮廓直角转弯的需要,沿开挖轮廓线打一排密集钻孔,净间距为孔径2.0倍左右,孔内不装炸药且邻近一排的开挖炮孔的行距适当缩短为正常孔距的0.5~0.75倍;孔距也缩短为正常的0.75倍。以严格确保开挖轮廓。此法称密集线孔爆破(Line Blasting)。

(2) 定向筑坝爆破:多用于定向爆破修筑蓄水坝、拦泥石流坝、尾矿坝、围堰工程、路堤和开山造地等。苏联在三十年代开始研究和应用,修建了一批拦泥石流坝。我国自1958年以来成功地用定向爆破筑蓄水坝及尾矿坝近50座以及若干路堤工程。1960年南水水电站(水库容积12亿立方米发电装机75,000千瓦)一次使用1394吨炸药筑高坝成功标志着我国定向爆破技术进入了世界先进行列。

定向控制抛掷爆破的基本方法有二。①定向坑法。即利用自然地形的自由凹面或利用辅助药包将不利地形进行予爆处理,创造主药包所需要的凹形定向坑作为理想临空面,使主药包爆破时大量土岩沿定向坑的指向抛出并在予定区域范围内堆筑成一定高度、大小和形状的爆堆体。②药形布置法。即采用不同的炸药布置形式,使炸药爆炸能量按所需要的方向发展以达到定向抛掷和堆筑的目的。如图(2)示

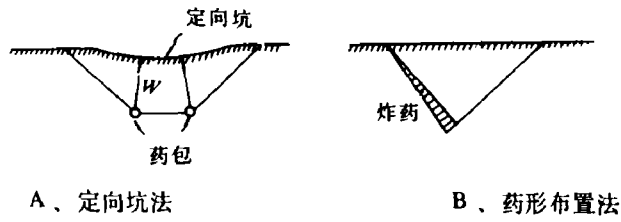


图2 定向抛掷爆破的基本方法示意图

(3) 采石爆破。包括建筑用材和矿石开采等。其特点是爆落岩块必须有一定尺寸规格或级配要求，以满足建筑用材规格、装载、运输、使用和冶炼方便的需要。例如一座百米高的堆石坝，坝体石料达百余万立方米到几百万立方米；一座大型钢铁联合企业矿石年开采量达上千万吨以上。因此提高石料和矿石开采的合格率，减少二次破碎对减小工程量、加快建设工期、降低造价和生产成本有很大的经济意义。所以许多发达国家如加拿大、英国、美国、瑞典、苏联和澳大利亚等都根据岩体爆破破碎机理，通过炸药与矿岩介质的匹配优选、合理的装药结构、大孔距爆破孔网参数布置和毫秒控制爆破技术相结合，建立爆破的数学模型，利用电算方法与现场试验对比相结合，求得爆落岩块的块度、级配和降低成本的最优化方案。此项工作在我国应大力组织攻关突破。

(4) 拆除爆破。多用于工程改建、扩建和废弃工程拆除。特别是城市改建工作中工业和民用建筑物的拆除任务愈来愈多。如烟囱、高层建筑等用爆破法拆除甚为简便。它的基本方法是用小量炸药布置在建筑物基础以及梁、柱连接处，使爆破造成结构失稳，利用结构自重作用使梁、柱和基础连接处出现塑性铰而自行原地塌倒，从而控制拆除建筑物倒塌的方位、范围。确保邻近建筑物免受损坏并为地面清理工作创造十分有利的条件。它具有成本低、时间短、操作简便和安全等优点，已在国内广泛使用。

(5) 岩塞爆破。主要用于天然湖泊和人工水库开发和扩建工程。当需要增设泄水隧洞时，为了避免隧洞进水口修建深水围堰的困难性和高昂造价时使用。其施工方法为：在湖泊或水库下游方面予先挖掘水工隧洞通向湖库，临近湖库水底处予留一块厚度相当的隧洞岩体有如天然的岩塞来挡水，待整个隧洞工程（包括洞身和进水口控制闸门和出水口的消能工程）就绪后再在该岩塞上钻孔或开挖药室（视岩塞直径大小和厚度而定），装药一次将岩塞炸碎炸通，形成稳定的进水喇叭口。石碴即随水流冲入予留的集碴坑内或直接从隧洞出口冲出，于是库水得到控制利用。此法在欧洲已有近百年的使用历史。但大直径的水下岩塞爆破则于1960年首先在加拿大休得巴斯水电站工程中使用。我国于1971年清河电厂首次成功后已有八次水利水电工程得到推广使用。图（3）为我国某水电站水下岩塞爆破工程实例示意图。

此外开塞爆破亦有用平炉出钢者（见本刊1982年第4期作者有关科技动态的报道）即采用一种爆破射流破塞装置，将平炉塞孔及时爆通，钢水自流而出。这种爆破开塞方法具有准确、及时、安全和简便等优点。

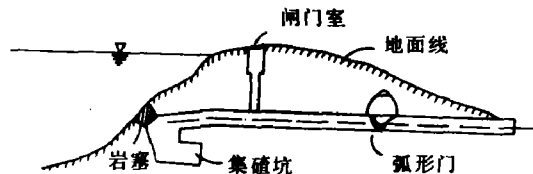


图3 开塞爆破示意图

(6) 爆炸压密。饱和砂土地基爆炸压密加固处理工作已有三十年历史。它是利用炸药爆炸的冲击和震动作用使饱和砂土产生瞬时液化作用，从而使土颗粒重新排列而增加其密度、强度和承载力。五十年代苏联和我国在修建某些水库时曾经研究和使用的。软土地基水下爆夯加固压密在港工建设中亦已采用。此外在黄土中利用不耦合的装药爆炸所产生的高温高压气体对土体的压密效应，而

应该指出，上述评定准则仅适用于单层或两层的砖木结构。其最大缺点是既没有反映结构物的型式、所用材料和动力特性，亦不考虑其质量和使用年限的实际情况。对于地下结构或半埋式的约束型结构则不适用。因为这些结构受载条件和结构型式均不同于地面建筑结构，并具有更为耐震的能力。尤其是近区钻眼爆破，一般震动频率较高（卓越频率约为30~50赫以上），当地震半波长小于结构特征尺寸时，动力荷载往往带有局部作用的性质，结构破坏的机制不尽相同，因此须另作研究。

近年来随着电子计算机的发展和普遍应用，爆破振动对建筑结构的影响已逐渐向动力分析法方向发展。

(2) 空气冲击波影响及控制

大规模加强抛掷爆破和井下爆破时，强烈的空气冲击波在一定距离范围内可以引起噪声干扰（频率为20~20000赫）和震害（20赫以下），摧毁设备、构筑物、管线、巷道支架等以及造成人员伤亡。空气冲击波强度用超压来表示，单位为公斤/厘米²或分贝。造成空气冲击波的主要原因是抵抗线过小，堵塞不良，裸露爆炸以及不利的气象条件（如逆温层、云层和风剪会产生冲击波的聚焦现象而使局部地区的空气冲击波超压增大）。根据美国爆破工手册资料，空气冲击波与炸药和距离之间的关系如图（4），

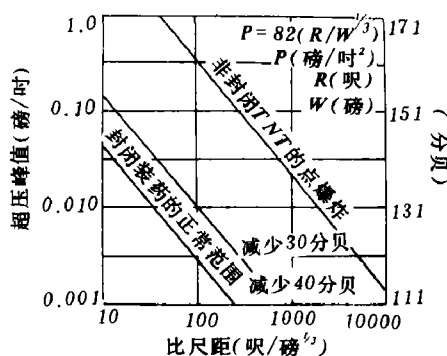


图4 空气冲击波强度与距离和药量的关系

空气冲击波对结构的影响参见表（2）

空气冲击波破坏影响表 表（2）

空气冲击波超压		空气冲击影响情况
分 贝	磅/吋 ²	
181	3.0	一般建筑严重损坏
171	1.0	大多数窗玻璃破碎
161	0.3	
151	0.1	有些窗玻璃破碎
141	0.03	有些大块窗玻璃破碎
131	0.01	

注：美国矿务局规定的安全标准为0.007(磅/平方英寸)或128分贝。美国垦务局暂定的允许极限为136分贝。

(3) 个别飞石

影响个别飞石较远的偶然性因素很多, 主要原因为: 堵塞质量不好; 岩体不均质, 特别是受断层、软弱夹层和溶洞等地质因素和地形因素(包括冲沟、凹面和多临空面地形)的影响。个别飞石距离远近范围有一定的方向性, 特别是定向爆破时, 指向较远, 侧面次之, 背面则较安全。飞石安全距离可参照下式估计:

$$R_F = 20 k_F n^2 w \quad (3)$$

式中 R_F ——飞石对人员的安全距离(米); n ——药包的爆破作用指数; w ——药包的最小抵抗线(米); k_F ——与地形、风向及地质条件等有关的系数, 一般为1~1.5。对设备的安全范围可按上式计算值减半考虑, 但应采取有效的防护措施。

GENERAL CONSIDERATIONS ON BLASTING ENGINEERING

Huo Yongji