

高等学校教材

施工技术

武汉水利电力学院 梁润 主编

水利电力出版社

高等学校教材

施 工 技 术

武汉水利电力学院 梁 润 主编

水利电力出版社

出版者说明

根据水利电力部教育司(83)教学字第6号、水利电力出版社(83)社总字第1号文决定,本书定名为《施工技术》。1983年8月在“施工教材编审小组扩大会议”曾调整书名为《水利水电工程施工技术》;由于出版原因,现仍以《施工技术》名称出版,特此说明。

前 言

本书是为水利水电工程施工专业编写的教科书。全书除绪论外共分八章，即：爆破工程施工；地基开挖与处理；灌浆工程施工；土石坝施工；地下建筑物施工；大坝混凝土施工；大坝混凝土施工的温度控制和水电站厂房施工等。其中的四章为水工水电站建筑物施工；另四章为建筑物施工中的一些专门问题。

为了保持书中内容一定的系统性，而又能兼顾到某些问题有作较深入阐述的余地，所以采取了建筑物施工和专门问题相结合的编写方式。

本书是由武汉水利电力学院水利水电工程施工教研室组织室内人员编写的。在近年来一些同志的教学实践和自编内部教材使用的基础上，同时参考了1980年出版的《水利工程施工》（武汉水利电力学院、成都科学技术大学编，水利出版社出版）的部分内容，由下列同志分工执笔编写而成：

绪 论——吴国栋

第一章 爆破工程施工——董振华

第二章 地基开挖与处理——聂天慧

第三章 灌浆工程施工——聂天慧

第四章 土石坝施工——梁 润

第五章 地下建筑物施工——李卷志

第六章 大坝混凝土施工——吴国栋 陈锦桂

第七章 大坝混凝土施工的温度控制——梁润 杨康宁

第八章 水电站厂房施工——冯立生

本书由武汉水利电力学院水利水电工程施工教研室梁润同志主编、陕西机械学院水利系孙振天同志主审。

主审人所提宝贵意见，出版社的同志和一些参加抄写、描图的同志付出的辛勤劳动，对本书能与读者见面起了很大作用，我们敬致谢忱！

由于水平所限，缺点或错误，恐在所难免，望能得到指正。

编 者

1984年6月

目 录

出版者的话

前 言

绪 论 1

第一章 爆破工程施工 3

第 1-1 节 土岩爆破机理与药包计算原理 3

第 1-2 节 爆破材料 9

第 1-3 节 爆破基本方法 21

第 1-4 节 水利水电工程中的特殊爆破 35

第 1-5 节 爆破安全与防护 55

第二章 地基开挖与处理 63

第 2-1 节 岩基开挖与处理 63

第 2-2 节 软基开挖与处理 75

第三章 灌浆工程施工 88

第 3-1 节 岩基灌浆 88

第 3-2 节 砂砾石地基灌浆 108

第 3-3 节 混凝土坝接缝灌浆 112

第 3-4 节 化学灌浆 125

第四章 土石坝施工 144

第 4-1 节 料场规划与布置 144

第 4-2 节 土石料的开挖运输 146

第 4-3 节 土石料压实 148

第 4-4 节 坝体填筑 162

第 4-5 节 质量检查控制及事故处理 186

第 4-6 节 雨季和冬季施工 170

第五章 地下建筑物施工 174

第 5-1 节 钻爆开挖 175

第 5-2 节 钻孔爆破 182

第 5-3 节 掘进机开挖 188

第 5-4 节 装碴与运输 193

第 5-5 节 现浇混凝土衬砌 196

第 5-6 节 新奥地利隧道工程法 203

第 5-7 节 施工安全与辅助作业 234

第六章 大坝混凝土施工 241

第 6-1 节 砂石料生产 241

第 6-2 节	模板工程	259
第 6-3 节	坝体施工的分缝分块	270
第 6-4 节	混凝土制备	273
第 6-5 节	混凝土运输	277
第 6-6 节	混凝土浇筑与养护	286
第 6-7 节	大坝混凝土的快速经济施工	289
✓ 第 6-8 节	水下混凝土施工	294
第 6-9 节	混凝土施工质量评定	297
第七章	大坝混凝土施工温度控制	303
第 7-1 节	热传导及混凝土热性能	305
第 7-2 节	混凝土浇筑温度及水泥水化热	311
第 7-3 节	坝体稳定温度场解算	314
第 7-4 节	坝体不稳定温度场解算	319
第 7-5 节	有限单元法解算坝体温度场	332
第 7-6 节	坝块的温度应力	354
第 7-7 节	混凝土的徐变与应力松弛	368
第 7-8 节	防止温度裂缝的允许温差标准与温度控制措施	370
第 7-9 节	混凝土预冷及预埋水管冷却	377
第 7-10 节	表面保护	396
✓ 第 7-11 节	混凝土冬季施工	404
第八章	水电站厂房施工	408
第 8-1 节	厂房施工特点	408
第 8-2 节	混凝土分缝分块及温度控制	410
第 8-3 节	施工布置与施工程序	415
第 8-4 节	尾水管模板	420
第 8-5 节	二期混凝土施工	440
附表	本书常用公制单位与国际制单位换算关系	446

绪 论

技术,是指人类在利用自然和改造自然的过程中积累起来并在生产劳动中体现出来的经验和知识,其中包括操作方面的技巧。它属于生产力的范畴。技术只有通过物化或者说通过精神变物质的过程,才能变成技术装备和技术措施。水利水电工程施工技术,是指水利水电建设中需要掌握的专业技术。它是人类改造江河变水害为水利、由蓝图变现实的手段。

水利水电工程建设,大致分为勘测、规划、设计和施工四个阶段。施工是最后的一个阶段。其主要任务是:充分发挥施工技术人员的能动性和创造性,把包括能源、原材料和设备在内的各种物资,结合施工技术,进行科学的组织、筹划和管理,达到用最少的人力、物力、财力和最短的时间,把设计付诸实施。因此,在工程施工中,必须真正做到安全、优质、快速和经济。这就必须要求对施工技术、施工机械化和施工组织管理三个方面,不断进行研究和总结。正因为如此,所以水利水电工程施工这门学科,又可分为水利水电工程施工技术、水利水电工程施工机械化和水利水电工程施工组织与管理三个分支学科。对水利水电工程快速经济施工来说,掌握先进的施工技术是基础,学会正确的使用施工机械是条件,进行科学的施工组织管理是关键。三者相辅相成,缺一不可。

采用先进的施工技术,必须因地制宜,必须认识水利水电工程施工特点,特别是大型水利水电工程的施工特点。这些特点主要是:

(1) 水利水电工程的施工,一般都是在高山峡谷的江河上进行,受地形、地质、水文、气象、水文地质和社会经济条件的限制比较大。

(2) 大型水利水电工程一般是多目标开发,涉及许多部门和地区的利益,矛盾十分复杂。合理解决矛盾求得总体最优,有着极大的经济意义。

(3) 大型水利水电工程施工所需材料、设备和生活资料的数量十分巨大,而往往又地处高山峡谷,交通不便,因而合理解决场内外的交通运输问题,对于整个工程快速、经济施工,具有关键性的影响。

(4) 大型水利水电工程,一般在上游形成相当大的库容,其挡水建筑物的安全,尤其关系到下游一定范围内人民生命财产的安全,因此,必须确保工程的施工质量。

(5) 大型水利水电工程施工,通常包括许多单项工程,工程量大、投资多、工期紧,相互干扰严重。按照系统概念的观点,大型水利水电工程施工,是由许多互相密切联系、互相依存、互相作用的部分(即系统、工种、工序、环节等)组成的。这些组成部分各自具有特定的功能和共同的目标。它们之间存在着固有的不以人们意志为转移的必然关系。人们只有认识了这些必然,才能利用先进施工技术和设备,进行科学的组织管理,达到既完成工程的施工任务,又能最有效最经济地使用人力、物力和财力。

水利水电工程施工技术,作为一门技术科学,其主要研究任务是:从水利水电工程施

工的需要和特点出发,探讨和发展有关工程安全、优质、快速、经济施工的技术。这些技术通常又大致分为:土石方工程、爆破工程、混凝土和钢筋混凝土工程、灌浆工程和地下工程等几个方面。有时也可以围绕一些典型的建筑物施工展开研究,分为土石坝施工、混凝土坝施工、隧洞施工及地下厂房施工等等。总结国内外水利水电工程施工的成功经验和失败的教训,从其它领域引用有关的先进技术,是其主要研究途径。先进的施工技术,应该有利于工程的连续、均衡和有节奏的施工。

随着科学技术和水利水电建设的迅速发展,水利水电工程施工技术,在近二十年来取得了显著的进展。例如:正是由于土石坝施工技术和高效大型机械的发展,土石坝比混凝土坝获得了更大的发展;在爆破工程方面,各种控制爆破技术(包括预裂爆破、光面爆破及定向爆破等)的发展,加快了地下工程和基础工程的开挖速度;在混凝土坝施工方面,传统的浇筑方式有了突破性的革新,表现在纵缝分块逐步为通仓浇筑所代替,同时碾压混凝土筑坝,已显示出了很大的优越性;采用“新奥法”进行地下工程支护,也是一个突破性的进展。当然,新的施工技术远不止这些,这里只不过是几个例子而已。

在我国,水利水电工程施工技术同发达国家相比,还存在一定的差距。但是,随着三门峡、新安江、丹江口、刘家峡、龚咀、乌江渡等大型水电站的建成,葛洲坝、龙羊峡、白山、安康和东江等在建的水电站的施工和引滦工程的高速度建设,在施工技术方面,也积累了许多宝贵的经验。预裂爆破在基础开挖和地下厂房开挖中的成功应用,特别是三向预裂爆破的试验成功;大型地下厂房的开挖和支护成功;石灰岩人工砂石骨料系统和高压灌浆取得的良好技术经济效益;土石坝全面机械化施工在降低造价方面的经验等等。标志着我国水利水电工程施工技术水平达到了一个新的高度,为今后水利水电工程建设在技术上打下了良好的基础。

展望未来,我国伟大的经济建设任务,规定了水利水电建设的规模愈来愈大,条件愈来愈复杂,特别是三峡、二滩、龙滩和李家峡等国内前所未有的巨型水电站,已列入国家重点建设项目,并将陆续开工。在这些大型工程的施工中,必将遇到很多新的复杂问题,例如,高混凝土坝的基础处理,高土石坝的防渗和快速经济施工,地下工程中的特大洞室和大直径的长隧洞施工等等,其中就包括了许多极其复杂的技术问题。我们必须抓紧世界新的技术革命这个时机,积极引进国外行之有效的并适合我国国情的一切先进的施工技术,同时,在施工的实践中,不断总结和发展我们自己的先进施工技术,促使我国的水利水电建设更好一些、更快一些、更省一些。在力求做到降低造价、优选方案、缩短建设周期的同时,把我国水利水电工程施工技术,推向更高的水平。

本课程是一门专业课,本教材围绕水利水电工程的几个典型建筑物的施工,并结合一些专门问题,着重阐明水利水电工程施工技术的基本原理、施工程序、施工特点、施工方法以及主要施工机械设备的选型等,同时适当介绍国内外施工技术的当前水平和发展趋势。学习本课程时,应运用先修课程的有关知识和工地实习获得的感性认识,深入掌握本课程的基本概念、基本原理和基本方法,以提高分析和解决施工中实际问题的能力。

由于水利水电工程施工技术的不断发展,因而学习本教材时,还应注意学习国内外有关参考资料,以扩大视野。

第一章 爆破工程施工

水利水电工程施工中，通常都要开挖大量土石方，爆破则是最有效的施工方法之一。现代爆破技术不仅是快速和经济施工的重要手段，而且还能有效地完成象地下爆破、水下爆破、预裂爆破和光面爆破等特定的技术要求。

本章的主要内容是：土岩爆破机理和药包计算原理、爆破材料、爆破基本方法、水利水电工程中的特殊爆破及爆破安全与防护等。

第 1-1 节 土岩爆破机理与药包计算原理

一、土岩爆破破坏机理

在炸药爆轰^①作用下，土岩的爆破破坏过程是一个复杂的过程。土岩之所以遭到破坏，主要是由炸药爆轰产生的冲击波和爆轰气体产物的作用造成的。土岩破坏过程非常短暂，通常只有几十毫秒时间就可完成。

(一) 土岩爆破破坏原因的几种假说

1. 爆轰气体产物膨胀推力破坏理论 这种理论认为，炸药爆轰时，在药包周围土岩中形成的压缩应力场引起土岩质点径向移动，而爆轰气体产物膨胀所产生的推力，促使质点的移动加剧，并使压缩应力在土岩中产生的径向裂隙向远处发展。如果土岩具有自由面时，则从药包中心到自由面的最短距离处，土岩质点移动的阻力为最小，质点移动的速度最高，因而在阻力不同的其它方向上造成土岩的剪切应力，当此应力超过极限抗剪强度时，土岩便发生破坏。如果爆轰气体产物的压力在土岩开始破裂时还很大，就会使破碎成块的土岩沿径向朝外作抛掷运动，如图1-1所示。

2. 应力波反射破坏理论 这种理论认为，土岩的破坏主要是自由面上应力波反射变为拉伸波造成的。破坏通常是从自由面朝药包方向发展。破坏和土岩移动的过程，如图1-2所示。

应力波反射破坏理论在一些土岩试件的爆破试验中得到证明。

3. 气体推力与反射应力波共同作用理论 不论是爆轰气体膨胀推力所产生的剪切作用，还是应力波反射拉伸所引起的复杂应力状态，都是造成土岩、特别是硬岩破坏的重要原因。爆轰气体膨胀推力作用的时间一般较长，使土岩在冲击波传布之后形成更长久的应力状态，对裂隙的形成和发展造成更有利的条件。自由面处应力波的反射，将进一步使压

① 爆轰(或称爆震)是爆炸的一种特殊情形，是一种特别稳定的爆炸形式。炸药的爆轰速度是个常数，这是其重要特性之一(黑火药没有这种特性，所以不产生爆轰)。爆炸与爆轰的区别是：爆炸乃是一个不稳定过程，它在传播过程中或者转变为爆轰或者就此消失。一般来说，“爆轰”这个词，就是它的不稳定形式和爆轰的稳定形式两者的广义统一概念。

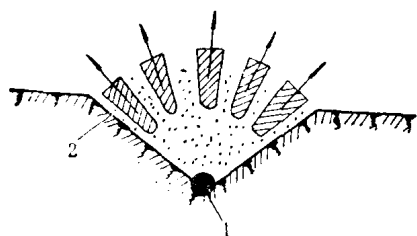


图 1-1 爆轰气体产物的推力作用
1—药包；2—土岩碎块

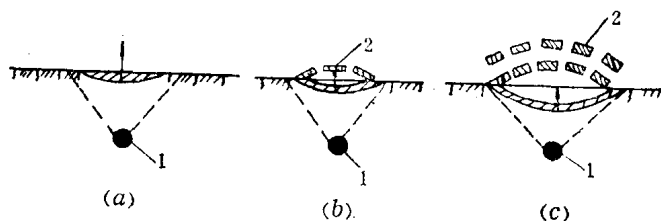


图 1-2 反射拉伸波的破坏作用
1—药包；2—土岩碎块

缩应力波最初形成的径向裂隙延伸发展。通常，应力波开始以冲击波的形式出现，经对周围土岩做功和衰减后，转变为弹性波；而爆轰气体膨胀的推力作用，则近乎静作用性质（称为准静态作用），它与爆轰结束时气体体积和能量的生成量以及能量释放速度等因素有关。

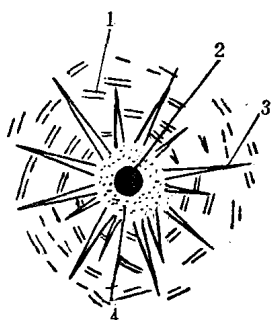


图 1-3 无限介质中药包爆破后的破坏情况
1—环向裂隙；2—药包；3—径向裂隙；4—粉碎区

上述三种土岩爆破破坏理论，在不同性质的介质中各有其根据。例如，对传布应力波性能很差的土壤，破坏主要靠爆轰气体产物膨胀的推力作用；对岩石，应力波反射拉伸和爆轰气体产物膨胀的推力，对其破坏都是主要因素，是共同起作用的结果。

（二）无限介质（土岩）中的爆破破坏机理

埋置很深的单个集中药包的爆破，可看作是无限介质中的爆破。如果把爆轰后的岩体剖切开来，则可看到如图1-3所示的破坏情况。

药包爆炸时，一般工程炸药在药包与土岩分界面上产生的压力，可达5~10万个大气压。岩体受到这种超高压的冲击，在药包周围的一小部分由于强烈压缩，温度达3000℃以上，形成熔融状塑性状态。随着冲击波的传播，爆炸能量向周围岩体释放，气体产物的压力和温度急剧下降。药包周围熔融状岩体的应力状态迅速解除，这部分岩体开始作向心运动，从而将熔岩粉碎成细微颗粒，这就是粉碎区形成的机理。由于岩体本身处于坚固的约束状态，动态抗压强度又很大，粉碎区的岩体消耗了冲击波的很大一部分能量，致使其在靠近药包的范围内（一般为2~3倍药包半径）衰减很快，超过此范围时，其压力已不足以将岩体压缩成塑性流态，所以，粉碎区的范围很小。

当冲击波进入粉碎区以外的岩壳时，岩体受到径向压缩而发生径向移动（如图1-4所示，AB段沿径向移动到CD位置），从而引起环向拉伸。由于岩石的动态抗拉强度只有其动态抗压强度的1/10左右，所以环向拉应力很容易超过岩石的动态抗拉极限，在岩体中就产生了径向裂隙。径向裂隙发展很快，一般为冲击波波速的0.15~0.4倍。径向裂隙与粉碎圈连通后，爆轰气体产物的压力虽然会由于药室体积的扩大而降低，但其仍可钻入裂隙，象尖劈一样使裂隙进一步扩展。在岩体中，径向裂隙一般可延伸到8~10倍药包半径（ R_0 ）处，这个范围叫做破碎区，其边界称为破碎圈。

当冲击波波头到达岩体中某一点时，如前所述，将产生岩体的强烈压缩和以后的弹性

恢复, 从而造成岩体的环向拉断或环向裂隙, 如图1-4。

径向裂隙和环向裂隙相互交叉、连通, 越靠近粉碎区, 裂隙间距越小, 破碎区中的岩体被纵横交错的裂隙切割成碎块(如图1-3)。

破碎圈以外, 应力波的瞬间应力状态和爆轰气体产物的准静态应力场, 都不能再引起岩体的破坏, 而只能造成弹性变形。所以, 破碎圈以外的区域统称之为震动区, 其中应力波可传到很远的距离, 变成振动波。

(三) 单集中药包在单自由面条件下的爆破

在实际工程爆破中, 药包通常埋置在距自由面不远处, 而且随着埋置深度的不同, 自由面对岩石爆破破碎过程产生的影响也不同。应力波在自由面处反射成为拉伸波, 而反射波与入射波的叠加在岩体中形成复杂的应力状态。所以, 岩石破坏的机理也较复杂。

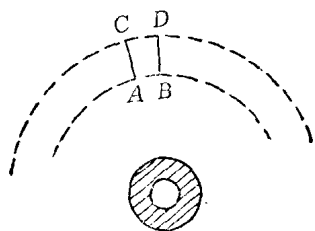


图 1-4 径向压缩引起环向拉伸

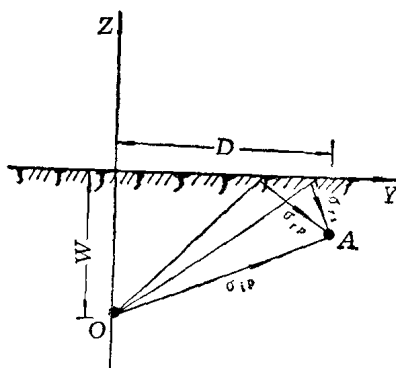


图 1-5 岩体中任一点A的受力状况

1. 爆轰波在岩体中引起的应力状态 取如图1-5所示的座标系统, 横轴Y表示自由面, 竖轴Z表示最小抵抗线W(由药包中心到自由面的最短距离)的方向, O表示药包中心, A点为岩体中的任一点。

如前所述, 药包爆炸时, 由药包中心向周围岩体传播着应力波, 这种波主要为纵波, 它遇到自由面时会反射为反射纵波和反射横波。

因此, 对A点来讲, 它受到入射纵波引起的应力 σ_{1p} 和反射纵波、横波引起的应力 σ_{2p} 和 σ_{3p} 三者的合力作用。根据爆破试验和点应力分析, 由上述合应力引起的三个主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 中, 当拉伸主应力 σ_2 出现极大值时, 岩体中各点的主应力方向将如图1-6所示(图中 η 表示距爆源的水平距离)。

这种应力分布方向, 就是爆破时在岩体中所产生的裂隙方向。在图1-6中, σ_2 是产生径向裂隙的根源, 裂隙方向随 η 值的增大逐渐发生偏转, 最后与自由面平行。生成的裂隙群大体似喇叭花状排列。

2. 爆轰气体产物引起的应力状态 因为应力波在岩体中传播时衰减很快, 其在岩体中引起的应力状态也会迅速消失。紧随应力波阵面之后产生的爆轰气体, 则较长时间以压力方式作用于岩体上。根据试验和计算资料, 岩体中各点的主应力 σ_1 、 σ_2 的作用方向如图1-7所示。比较图1-7和图1-6, 可以看出两者很近似, 只是在爆轰气体产物作用下, σ_1 常为压应力, 而 σ_2 不常为拉应力, 在离爆源距离超过某一极限值后, 便出现压缩应力区。

3. 由反射拉伸波引起径向裂隙的延伸 衰减后的反射拉伸波, 仍可能同径向裂隙尖端

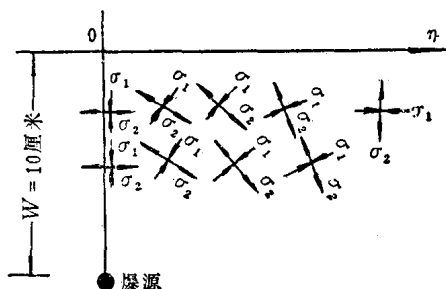


图 1-6 拉伸应力 σ_2 达到极大值时 σ_1 和 σ_2 的方向

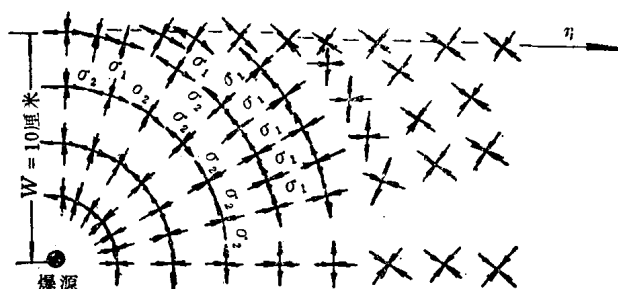


图 1-7 爆生气体产物作用下主应力 σ_1 和 σ_2 的作用方向

处的应力场相叠加，促使径向裂隙大大向前延伸。图1-8表明，当径向裂隙的方向与反射拉伸波的传播方向成 90° 交角时，裂隙延伸效果最明显；当径向裂隙与反射拉伸波传播方向成 θ 角相交时，将出现两种情况：或者以一个 $\sin\theta$ 的拉力分量，促使径向裂隙的尖端继续伸展；或者造成一个分支裂隙。至于垂直自由面方向的径向裂隙，则完全不会因反射拉伸波的影响而继续延伸发展。

二、爆破漏斗

埋置很深的药包爆炸时，爆轰波由药包中心向四周传播，造成岩石向外发生径向运动。这种运动，在无限岩体内，受到了外层岩体的阻挡；当药包附近存在自由面时，由于外层岩体厚度有限，阻力不大，因而产生向自由面的径向位移。同时，由于反射拉伸波的产生，造成了较大范围内的岩体破坏。

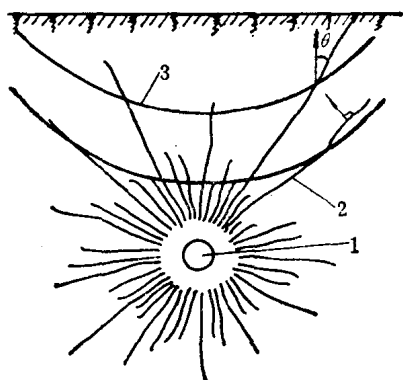


图 1-8 反射拉伸波对径向裂隙的影响
1—药包；2—径向裂隙；3—反射拉伸应力波

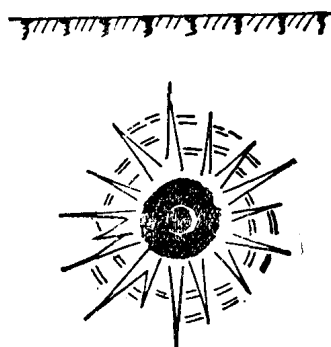


图 1-9 内部作用药包

当最小抵抗线（药包中心到自由面的最短距离） W 值，大于该药包爆破时所能造成的破坏区半径时，由于压缩应力波和反射拉伸波分别造成的两组裂隙，不能互相连接和交叉，因而在自由面上看不到明显的破坏，这种爆破作用称为内部作用，相应的药包则称为内部作用药包，如图1-9所示。

当 W 值减小时，到达自由面的压缩应力波和反射拉伸波的强度增大，造成的破坏程度也随之增大。当 W 值减小到等于该药包的破坏区半径时，由压缩应力波和反射拉伸波所产

生的两组裂隙就连接起来，形成一个统一的破坏区。此时，在自由面上可看到岩石明显的外部破坏。这种爆破作用称为松动爆破，相应的药包称为松动爆破药包，如图1-10所示。

当药包距自由面的距离小于药包爆破破坏区半径时，或 W 值不变而加大药包装药量时，岩石不仅被炸碎，而且过剩的爆破能量会将破碎后的岩块向外抛出，这种爆破作用称为抛掷爆破，相应的药包叫做抛掷爆破药包，如图1-11所示。

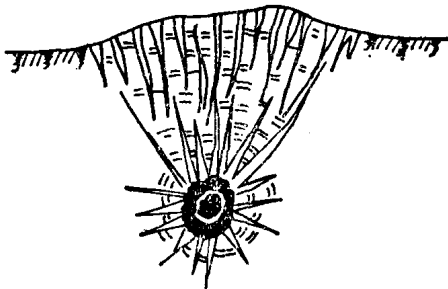


图 1-10 松动爆破药包

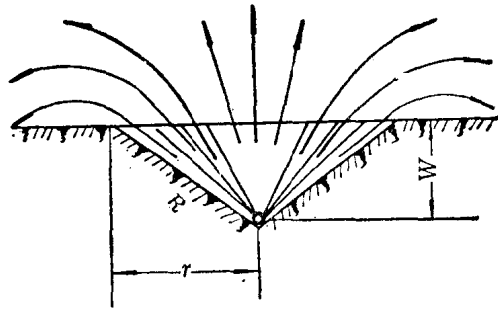


图 1-11 抛掷爆破药包

W —最小抵抗线； r —漏斗底部半径； R —漏斗破坏半径

药包爆破的抛掷方向，由最小抵抗线方向决定。因该方向阻力最小，爆轰气体产物首先在此方向的自由面上冲开缺口，把岩石碎块向外抛出。在最小抵抗线附近，岩块抛速最高；在爆坑边缘处抛速为零，不产生抛掷现象。这个爆坑通常叫做爆破漏斗，如图1-12所示。

在抛掷过程中，一部分岩块被抛到爆坑范围以外，一部分又回落到爆坑中。

爆破漏斗状如倒立圆锥（当自由面为水平时）。漏斗底部半径为 r ，由药包中心到自由面的垂直距离就是最小抵抗线 W 。漏斗底部半径 r 与最小抵抗线 W 的比值，称为爆破作用指数，以 $n = \frac{r}{W}$ 来表示。根据 n 值的大小，可区分爆破的性质：

$n > 1$ 时为加强抛掷爆破。漏斗的张开角大于 90° ，如图1-12(b)所示；

$n = 1$ 时为标准抛掷爆破。漏斗的张开角等于 90° ，如图1-12(a)所示；

$0.75 < n < 1$ 时为减弱抛掷爆破。漏斗的张开角小于 90° ，如图1-12(c)所示；

$0 < n < 0.75$ 时为松动爆破。无岩块抛掷，如图1-12(d)所示。

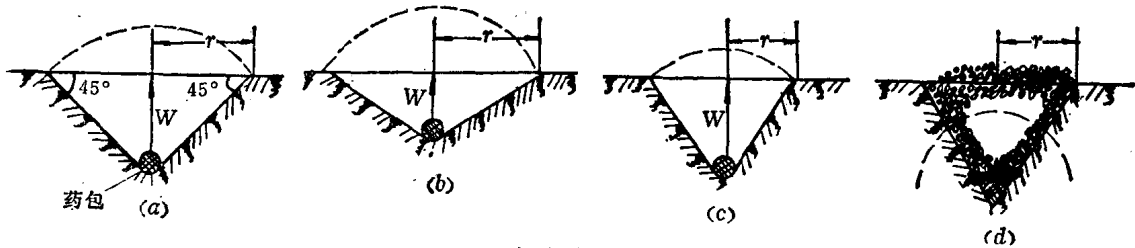


图 1-12 各种爆破漏斗示意图

(a)标准抛掷爆破漏斗；(b)加强抛掷爆破漏斗；(c)减弱抛掷爆破漏斗；(d)松动爆破漏斗

r —漏斗底部半径； W —最小抵抗线

三、药包装药量计算原理

如前所述,在单水平自由面条件下的药包爆破时,将在土岩中产生爆破漏斗。在一定的炸药和土岩条件下,爆落的土石方体积同装药量成正比,即

$$Q = KV \quad (1-1)$$

式中 Q ——装药量(公斤);

K ——爆破单位体积土石的耗药量(公斤/米³);

V ——爆破漏斗体积(米³)。

在集中药包标准抛掷爆破时,由于 $n = 1$, 故 $r = W$ 。因此,标准抛掷爆破漏斗的体积 V 为

$$V = \frac{\pi r^2}{3} W \approx W^3$$

所以,标准抛掷爆破药包装药量可用下式表示:

$$Q = KW^3 \quad (1-2)$$

在岩石性质、炸药品种和药包埋深都不变的条件下,增大或减少装药量,就可获得加强抛掷或减弱抛掷爆破漏斗。这样,适用于各类型抛掷爆破的装药量计算公式,可写成下述形式:

$$Q_{\text{抛}} = f(n)KW^3 \quad (1-3)$$

式中 $f(n)$ ——爆破作用指数函数。

爆破作用指数函数 $f(n)$ 的具体计算方法很多,我国常用下述公式:

$$f(n) = 0.4 + 0.6n^3 \quad (1-4)$$

因此,公式(1-3)可写成

$$Q_{\text{抛}} = (0.4 + 0.6n^3)KW^3 \quad (1-5)$$

松动爆破的装药量,可用下式计算:

$$Q_{\text{松}} = (0.33 \sim 0.55)KW^3 \quad (1-6)$$

上述计算公式中,单位耗药量 K 值的确定,应考虑多方面的因素,经综合分析后定出:

- (1) 查表。参考定额或有关资料提供的数据;
- (2) 参考条件相似的工程或本工程的实际单位耗药量的统计数据;
- (3) 在需要进行爆破的岩石中,进行标准抛掷爆破漏斗试验,实测和计算出单位耗药量。

总之,装药量的多少,取决于爆破岩石的体积、爆破漏斗的规格和其它有关参数。但上述计算公式,对于爆破质量、岩石破碎块度等要求,均未得到反映。因此,必须在实际应用中根据现场具体条件和技术要求,加以必要的修正。

以上所列的装药量计算公式都是以单自由面集中药包爆破为前提的。但在工程实践中,都采用成组药包,同时,为了改善爆破效果,大都利用更多的自由面进行爆破。这样,就使得爆破漏斗的形状和大小变得很复杂。因此,在计算装药量时,就需要按具体情况确定每个药包所能爆破的体积和需要的装药量,然后进行累计,从而得出总装药量。

第 1-2 节 爆 破 材 料

所谓爆炸,实质上是指物质的潜能瞬时转化为作用于周围介质的机械功的过程,并伴随有声、光等效应的出现。

爆破是利用爆炸所产生的热和极高的压力,来改变或破坏周围介质的过程。爆破必须使用一定的爆破材料,它通常分为炸药和起爆材料两类。

一、炸药的基本概念

炸药是稍受外力就容易引起高速化学反应,并产生大量气体和热量的物质。同时,炸药是一种能把它所集中的能量在瞬间释放出来的物质。

物质能成为炸药并发生爆炸,必须具备以下三个要素:

1.放热反应 炸药在爆炸瞬间释放出相当大的热量,是它对周围介质作机械功的物质基础,也是能使反应独立地、高速进行的首要因素。显然,如果是吸热反应,则必须从外部补充热量,才能维持反应的继续进行。

2.反应速度快 由于反应速度快,生成的气体产物来不及扩散就被反应生成的热量加热到很高温度。这种高温气体几乎全部聚集在药室内,压力可达几万到几十万个大气压力,因而具有很高的能量密度。煤在空气中获取氧,故燃烧速度缓慢,生成的热量不断扩散于大气之中,能量密度只有4.1千卡/升,所以不能形成爆炸。梯恩梯炸药的爆热虽只有950千卡/公斤,但靠本身所含的氧进行反应,反应时间只有几万分之一秒,气体产物瞬间就被加热到3000℃以上,能量密度高达1570千卡/升。这种高温、高压和高能量密度的气体迅速膨胀,就形成了爆炸现象。

3.生成大量气体 高速放热反应虽是爆炸的必要条件,但还不是充分条件。有些化学反应,虽能迅速放出巨大热量,但因不生成大量气体,故不能产生爆炸现象。

由于气体可压缩性和膨胀系数很大,在炸药爆炸瞬间处于强烈的压缩状态,贮存了极大的压缩能,因而在其膨胀过程中,可将内能释放出来,迅速转变为机械功。

炸药就是具备上述三要素的物质,通常由碳、氢、氧、氮等元素组成。

二、炸药的主要性能

炸药的种类、品种很多,性能各不相同。即使是同一品种的炸药,在储存一段时间后,爆炸性能也会发生变化。炸药的主要性能有敏感度、安定性和爆炸稳定性等。了解和掌握炸药的性能,是关系到安全可靠地使用炸药的重要问题。

(一)炸药的敏感度

在外界能量作用下,炸药发生爆炸的难易程度,称为炸药的敏感度。敏感度越高,所需要的起爆能越小。炸药的敏感度包括:

1.爆燃点 表示炸药对热能的敏感度,即在规定的时间内(5分钟),使炸药爆炸的最低温度。一些常用炸药的爆燃点如表1-1所示。

表 1-1		一些常用炸药的爆燃点				
炸药名称	雷 汞	硝化甘油	梯 恩 梯	黑 索 金	黑 火 药	硝酸类炸药
爆燃点(°C)	175~180	200~205	290~295	225~235	290~310	280~320

表1-1中所列数据只表明安全处理炸药的温度范围。在长时间的温度影响下，即使比表中所列温度低，也会发生爆炸，这一点要特别引起注意。

2. 发火性 表示炸药对火焰的敏感度。有些炸药的爆燃点虽然高，但接触火焰或火花时，很易发火引起爆炸，如黑火药等。在使用炸药时，禁止使用铁器工具，以防撞击产生火花。

3. 撞击敏感度 表示炸药对机械作用的敏感度。撞击可使炸药局部加热到爆燃点，立即发生爆炸。在制造、加工、运输、使用和保管炸药的过程中，要特别注意撞击对炸药的危险性。一些常用炸药的落锤撞击敏感度列于表1-2中。

表 1-2 一些常用炸药的撞击敏感度（落锤高25厘米，重10公斤）						
炸药名称	硝化甘油	梯恩梯	黑索金	黑火药	硝酸类炸药	泰安
爆炸百分率(%)	100	4~8	70~80	50	16~32	100

4. 起爆敏感度 常用引起爆炸的极限起爆药量多少来表示。起爆药量小，说明该炸药的起爆敏感度高。例如，用雷汞作起爆药，起爆黑索金时，最小药量为0.14克；起爆梯恩梯时需0.15克；起爆2#岩石铵梯炸药时需0.17~0.28克。这说明黑索金起爆敏感度高，2#岩石铵梯炸药则较低。

炸药的起爆敏感度，还可用殉爆距离来衡量。所谓殉爆，是指由于一个药包的爆炸，引起与其相距一定距离处的另一药包爆炸的现象。能够连续三次使该药包出现殉爆的最大距离，叫做该炸药的殉爆距离。由于殉爆距离的测定方法简单易行，能反映低敏感度混合炸药的实用性能，故应用较普遍。

上述炸药的敏感度，常随掺和物的不同而改变。当炸药中有砂、碎玻璃、金属屑等具有棱角的坚硬掺和物时，敏感度则提高；当掺有水、石蜡、沥青、油、凡士林等柔软的热容量大或发火点高的掺和物时，敏感度则降低。所以，在工程现场使用炸药时，如未进行认真可靠的试验，不可任意加掺和物，否则将会引起意外事故发生。

（二）炸药的安定性

炸药在长期贮存中，保持其原有物理、化学性质不变的能力，称为炸药的安定性。

1. 物理安定性 取决于炸药的物理性质。主要有吸湿、结块、挥发、渗油、老化、冻结、耐水等性能。

硝酸炸药与黑炸药极易吸湿变潮，严重时丧失爆炸能力。贮存时应注意仓库干燥和通风良好，使用时要注意防水。结块的硝酸炸药会发生爆炸不完全或拒爆，需揉松或大块加工粉碎后，才能使用。

胶质炸药易渗油、老化、冻结、挥发。渗出的油斑是敏感度很高的硝化甘油，极易爆炸。因此，在贮存过程中应定期对其外观进行检查，发现有渗油现象，应及时处理。老化的胶质炸药，在外观上看，是透明度大、可塑性小。老化后敏感度降低。冻结的胶质炸药经解冻后，才能使用，否则，极易引起爆炸。硝化甘油炸药易挥发失去甘油，改变炸药性质。

胶质炸药与梯恩梯有很好的耐水性，适用于水下爆破。

2. 化学安定性 取决于炸药的化学性质。

硝基(NO_2)炸药的化学安定性较高,如无杂质,可存放多年而不改变其原有成分及爆炸性能。

硝酸脂类(硝化甘油类)炸药的化学安定性较低,在温度过高时就会发生化学分解而放出热量,能导致炸药仓库自燃和爆炸。硝化甘油在 50°C 时开始分解放热,如热量不能及时散发,也会引起自燃与爆炸。因此,在贮存硝化甘油类炸药时,不能堆放过高,要防止受阳光照射,并应经常保持仓库通风良好,以免产生爆炸事故。

(三) 炸药的爆炸稳定性

炸药起爆后,若能以恒定不变的速度,自始至终保持完整的爆炸反应,称为稳定的爆炸。爆炸不稳定,会降低效果,或发生不完全爆炸,甚至拒爆。在钻孔爆破实际工作中,影响爆炸稳定性的主要因素:

1. 药包直径 大量试验证明,当药包直径在一定范围内增大时,爆速、猛度则显著增加;当直径增大到一定值后,爆速和猛度的增加就显著变慢。药包直径减小时,爆速、猛度随之降低。当直径小于某一值时,则易产生不稳定爆炸,此值称之为临界直径。硝铵炸药药卷直径对爆速影响很大,常用的直径为32毫米。

2. 炸药密度 单位体积炸药的重量称为炸药密度。随着密度的增大,炸药爆速和猛度提高,但当密度增大到某一限度后,爆速和猛度又开始降低。炸药的密度一般为 $0.9\sim 1.6$ 克/厘米³。

(四) 炸药的爆炸性能

炸药的爆炸性能,主要反映在以下几方面。

1. 爆速 炸药爆炸时的分解速度。炸药的爆速一般为 $2000\sim 7500$ 米/秒。

2. 爆热和爆温 1公斤炸药爆炸分解所生成的热量称为爆热,以千卡/公斤表示。爆炸生成物所能达到的最高温度称为爆温,以 $^\circ\text{C}$ 表示。

3. 爆炸气体量和爆压 1公斤炸药爆炸所生成的气体体积,称为爆炸气体量,以升/公斤表示。爆生气体产生的压力,称为爆压,以大气压或者公斤/厘米²表示。

炸药爆炸时,爆速快、爆热量大、爆温高、爆生气体量多,则产生的压力就大,综合表示为炸药的威力。在实用上,通常以爆力和猛度来表征炸药的威力。

4. 爆力 炸药爆炸破坏一定量体积介质(土或岩石)的能力。炸药的爆力越大,破坏力就愈强,破坏范围和体积就愈大。爆力的大小取决于爆炸时所产生的气体量、热量和温度等。

爆力一般用铅铸孔法测定。其原理:将一定量的炸药放在铅柱中的圆孔内,爆炸后,以圆孔扩大部分的体积来衡量炸药的爆力。

5. 猛度 炸药爆炸使一定量的介质破坏成为细块的能力。猛度越大,介质被炸得越碎。猛度与炸药爆速有关,爆速愈高,猛度也愈大。

通常用铅柱压缩试验测定炸药猛度。其原理:将定量炸药置于铅柱上面的钢板上,爆炸后,铅柱被压缩,以其压缩量的大小来衡量炸药的猛度。

6. 氧平衡 炸药在爆炸分解时的氧化情况。如炸药本身的含氧量恰好等于其中可燃物完全氧化时的需要量,炸药爆炸后,生成二氧化碳和水,并放出大量的热,这种情况就叫