



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水利水电工程施工技术

(第二版)

主 编 钟汉华 冷 涛

副主编 付凌云 欧阳越

Higher Education

43
2



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水利水电工程施工技术

(第二版)

主 编 钟汉华 冷 涛

副主编 付凌云 欧阳越



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分十一章，包括：爆破工程，砌筑工程，模板工程，钢筋工程，混凝土工程，灌浆工程，施工导流与水流控制，基础处理，土石建筑物施工，混凝土建筑物施工，隧洞施工等。

本书可供土木工程设计人员、施工技术人员使用，也可供土木类各专业大、中专学生及各类职业学校学生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程施工技术 / 钟汉华, 冷涛主编. -- 2
版. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 3
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5084-7319-2

I. ①水… II. ①钟… ②冷… III. ①水利工程—工
程施工—高等学校—教材②水力发电工程—工程施工—高
等学校—教材 IV. ①TV5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第039519号

书 名	普通高等教育“十一五”国家级规划教材 水利水电工程施工技术 (第二版)
作 者	主编 钟汉华 冷涛 副主编 付凌云 欧阳越
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88389994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 20.25印张 480千字
版 次	2004年9月第1版 2010年3月第2版 2010年3月第5次印刷
印 数	14101—18100册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是根据教育部《关于加强高职高专人才培养工作意见》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》等文件精神，根据“水利水电工程”、“农业水利技术”两专业指导性教学计划及教学大纲组织编写的。

本书内容包括水利水电土建工程常见工种施工工艺与建筑物施工技术两大部分。在编写过程中，我们努力体现高等职业技术教育教学特点，并结合我国水利水电工程及农业水利工程施工的实际精选内容，以贯彻理论联系实际，注重实践能力的整体要求，突出针对性和实用性，便于学生学习。同时，我们还适当照顾了不同地区的特点和要求，力求反映国内外水利水电工程及农业水利工程施工的先进经验和技术成就。

参加本书编写的有湖北水利水电职业技术学院钟汉华（绪论、第三章、第四章），冷涛（第一章），付凌云（第二章），罗岚、曲炳良（第六章），孙荣鸿（第七章），刘烈兰（第八章），郑玲（第九章），水利部发展研究中心欧阳越（第五章），中国葛洲坝集团公司朱明政（第十章），长江勘测规划设计研究院彭绍才（第十一章）。全书由钟汉华、冷涛担任主编，付凌云、欧阳越担任副主编，武汉大学余成学、中水北方勘测设计研究有限责任公司王晓全担任主审。

本书大量引用了有关专业文献和资料，未在书中一一注明出处，在此对有关文献的作者表示感谢。由于编者水平有限，加之时间仓促，难免存在错误和不足之处，诚恳地希望读者批评指正。

编 者

2010 年 3 月

目 录

前言

绪论	1
第一章 爆破工程	4
第一节 爆破的概念与分类	4
第二节 爆破材料	8
第三节 起爆方法	12
第四节 爆破施工	15
第五节 控制爆破	19
第六节 爆破施工安全知识	23
复习思考题	26
第二章 砌筑工程	27
第一节 砌筑材料与砌筑原则	27
第二节 砌石工程	29
第三节 砌砖工程	35
第四节 砌筑工程季节性施工及施工安全技术	41
复习思考题	43
第三章 模板工程	45
第一节 模板分类和构造	45
第二节 模板施工	49
第三节 脚手架	52
第四节 模板施工安全知识	56
复习思考题	57
第四章 钢筋工程	58
第一节 钢筋的验收与配料	58
第二节 钢筋内场加工	63
第三节 钢筋接头的连接	74
第四节 钢筋的冷拉	81

第五节	钢筋的绑扎与安装	83
第六节	预埋铁件	85
第七节	钢筋安装的质量控制与施工安全技术	86
	复习思考题	88
第五章	混凝土工程	90
第一节	普通混凝土的施工工艺	90
第二节	特殊混凝土的施工工艺	116
第三节	预制混凝土构件和预应力混凝土施工	125
第四节	混凝土冬季、夏季及雨季施工	128
第五节	混凝土施工质量控制与缺陷的防治	131
第六节	混凝土施工安全技术	135
	复习思考题	138
第六章	灌浆工程	141
第一节	灌浆材料与灌注浆液	141
第二节	灌浆设备	143
第三节	灌浆施工	145
第四节	灌浆施工安全技术	161
	复习思考题	163
第七章	施工导流与水流控制	164
第一节	施工导流	164
第二节	截流	171
第三节	施工排水	175
第四节	施工度汛及后期水流控制	178
	复习思考题	179
第八章	基础处理	181
第一节	土基处理	181
第二节	岩石地基处理	198
	复习思考题	200
第九章	土石建筑物施工	202
第一节	土的工程性质	202
第二节	土石方平衡调配原则和土方工程量计算	203
第三节	土方工程施工工艺	204
第四节	土石坝施工	216
第五节	面板堆石坝施工	223
第六节	砌石坝施工	226
第七节	渠道施工	229

复习思考题	233
第十章 混凝土建筑物施工	235
第一节 砂石骨料生产	235
第二节 大体积混凝土温度控制	241
第三节 混凝土坝施工	244
第四节 水电站厂房施工	256
第五节 水闸施工	265
第六节 渠系建筑物施工	270
复习思考题	279
第十一章 隧洞施工	281
第一节 隧洞开挖	281
第二节 掘进机开挖	291
第三节 盾构机开挖	298
第四节 隧洞的衬砌与灌浆	302
第五节 喷锚支护技术	307
第六节 隧洞施工安全技术	313
复习思考题	314
参考文献	316

绪 论

水利水电工程施工技术是一门理论与实践紧密结合的专业课。它是在总结国内外水利水电工程建设经验的基础上,从施工技术、施工机械等方面,研究水利水电建设基本规律的一门学科。

一、我国水利水电工程施工的成就与发展

我国是水利大国,与华夏文明一样,治水的历史源远流长,治水的成就灿烂辉煌。从举世闻名的都江堰,到气势磅礴的三峡工程;从大禹治水的“定九州”,到“98大洪水”百万军民的“三个确保”(确保长江干堤安全,确保重要城市安全、确保人民生命安全),中华民族在与水的抗争中得到凝聚和发展。特殊的自然地理条件,决定了除水害、兴水利历来是我国治国安邦的大事。水利兴则天下定,仓廩实,百业兴。历代善治国者均以治水为重。几千年来,修建了都江堰工程、黄河大堤、南北大运河以及其他许多施工技术难度大的水利工程。在抗洪斗争中,创造了平堵与立堵相结合的堵口方法,取得了草土围堰等施工经验。这些伟大的水利工程和独特的施工技术,至今仍发挥着作用,有力地促进了我国水利水电建设的发展。

1949年新中国成立后,我国水利建设事业取得了辉煌的成就。在水利建设中,江河干支流上加高加固和修建了大量的堤防,整治江河,提高了防洪能力。修建了官厅、佛子岭、大伙房、密云、岳城、潘家口、南山、观音阁、桃林口、江垭等大型水库,为防洪、蓄水服务。修建了三门峡、青铜峡、丹江口、满拉、乌鲁瓦提等防洪、蓄水、发电等综合利用的水利枢纽。这些工程中有各种形式的高坝,我国坝工技术有飞跃的发展。在灌溉工程方面,修建的人民胜利渠是黄河下游第一个引黄灌溉渠。还修建了渭史杭灌区、内蒙古引黄灌区、林县红旗渠、陕甘宁盐环定扬黄灌区、宁夏扬黄灌区等。在跨流域引水工程方面修建了东港供水、引滦入津、南水北调东线一期、引黄济青、万家寨引黄入晋工程等。我国取水、输水、灌溉技术达到了国际水平。

在防洪方面,修建和加高加固大江大河堤防 26 万 km,兴建水库 8.5 万座,总库容 4924 亿 m³,初步控制了常遇洪水,保护了 4 亿多人口、470 座城市、5 亿亩耕地和大量交通道路、油田等基础设施。新中国成立后,战胜了历次大洪水和严重的干旱灾害,黄河年年安澜。1998 年大洪水,长江堤防保持安澜,松花江、嫩江主要城市和河段保证了安全。

在农田水利方面,灌溉面积发展到 8 亿亩,灌区生产的粮食占全国总产量的 75%,棉花和蔬菜产量占全国总产量的 90%,我国以占世界近 10%的耕地面积,解决了占世界 22%人口的粮食问题。

在供水水源方面,兴建了大量的蓄水、引水、扬水工程;抽用地下水,农业灌溉和城



市工业供水水源已经初具规模，乡镇供水发展迅速，水利工程年供水能力达 5800 亿 m^3 。修建各种农村饮水工程 315 万处，解决了 2 亿多人和 1.3 亿头牲畜的饮水问题。

在水资源调配方面，兴建了一批流域控制性工程，以及跨流域调水工程，初步解决了区域水资源分布和城乡工农业用水的矛盾，缓解了国民经济和社会发展的用水需要。随着长江三峡水利枢纽工程和黄河小浪底水利枢纽工程的建成，极大缓解了用水需要。南水北调工程规模巨大，正在兴建中。

在水电建设中，修建了狮子滩、新安江、刘家峡、新丰江、六郎洞、葛洲坝、白山、东江、龙羊峡、李家峡、鲁布革、小浪底、水口、天生桥二级、天生桥一级、漫湾、五强溪、隔河岩、岩滩、万家寨、二滩、三峡等各种类型的大型水电站，还修建了数以万计的中小型水电站。目前水电站装机 17152 万 kW（截至 2008 年底），年发电量约为 5633 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。大型水电站供应了工业和城市用电，支持灌溉用水。中小型水电站供应全国 1/3 的县、45% 的国土面积和 70% 的贫困山区用电。我国装机容量位居世界前列，在水电技术上达到国际水平，能修建各种类型、条件复杂的大型水电站。

施工技术也不断提高。采用了定向爆破、光面爆破、预裂爆破、岩塞爆破、喷锚支护、预应力锚索、滑模和碾压混凝土及混凝土防渗面板等新技术、新工艺。

施工机械装备能力迅速增长，使用了斗轮式挖掘机、大吨位的自卸汽车、全自动化混凝土搅拌楼、塔带机、隧洞掘进机和盾构机等。水利工程施工学科的发展，为水利水电建设事业展示了一片广阔的前景。

在取得巨大成就的同时，应认识到我国施工水平与先进国家相比尚有较大差距。如新技术、新工艺的研究、推广、使用不够；施工机械还比较落后，配套不齐，利用率不充分，施工组织管理水平不高。这些和我国水电建设事业的发展是不相适应的，这就要求我们必须认真总结过去的经验和教训，努力学习和引进国外先进的技术和科学的管理方法，走出一条适合我国国情的水利水电工程建设新路。

二、水利水电工程施工技术的特点

(1) 水利工程施工多在河流上进行，因而需要采取导截流、基坑排水、施工度汛、施工期通航及下游供水等措施，以保证工程施工的顺利进行。

(2) 水利工程施工经常遇到复杂的地质条件，如渗漏、软弱地基、断层、破碎带及滑坡等，因而要进行相应的地基处理，以保证施工质量。

(3) 水利工程多为露天施工，需要采取适合的冬季、夏季、雨季等不同季节的施工措施，保证施工质量和进度。

(4) 水利工程一般都是挡水或过水建筑物，这些建筑物的安全往往关系到国计民生和下游千百万人民生命财产的安危，因此必须确保施工质量。

三、课程内容和方法

本课程将系统地阐述水利水电土建工程中各主要工种的施工工艺、主要水工建筑物的施工程序与方法等内容。通过学习，要求了解水利工程中施工常用的施工机械的主要组成部分、工作原理、主要性能及其选择；掌握主要工种的施工过程、施工方法、操作技术、质量控制检查、施工安全技术以及主要水工建筑物的施工特点、施工程序和施工技术要求、施工方法以及质量控制检查。



根据教材内容和课程实践性很强的特点，学习中应掌握基本概念、基本原理、基本方法，结合所学过的课程，循序渐进地进行。必须密切联系生产实际，配合生产实习、生产劳动、生产现场教学、电化教学、多媒体教学、课程作业、毕业设计等教学环节，运用所学的施工知识，才能有效地掌握本课程的内容。

第一章 爆 破 工 程

我国是黑火药的诞生地，也是世界上爆破工程发展最早的国家。火药的发明，为人类社会的发展起到了巨大的推动作用。工程爆破是随着火药而产生的一门新技术。随着社会发展和科技进步，爆破技术发展迅速并渐趋成熟，其应用领域也在不断扩大。爆破已广泛应用于矿山开采、建筑拆迁、道路建设、水利水电、材料加工以及植树造林等众多工程与生产领域。

在进行水利水电工程施工时，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 爆破的概念与分类

一、爆破的概念

爆破是炸药爆炸作用于周围介质的结果。埋在介质内的炸药引爆后，在极短的时间内，由固态转变为气态，体积增加数百倍至几千倍，伴随产生极大的压力和冲击力，同时还产生很高的温度，使周围介质受到各种不同程度的破坏，称为爆破。

二、爆破的常用术语

1. 爆破作用圈

当具有一定质量的球形药包在无限均质介质内部爆炸时，在爆炸作用下，距离药包中心不同区域的介质，由于受到的作用力有所不同，因而产生不同程度的破坏或振动现象。整个被影响的范围就叫做爆破作用圈。这种现象随着与药包中心间的距离增大而逐渐消失，按对介质作用不同可分为4个作用圈。

(1) 压缩圈。图1-1中 R_1 表示压缩圈半径，在这个作用圈范围内，介质直接承受了药包爆炸而产生的极其巨大的作用力，因而如果介质是可塑性的土壤，便会遭到压缩形成孔隙；如果是坚硬的脆性岩石便会被粉碎。所以把 R_1 这个球形地带叫做压缩圈或破碎圈。

(2) 抛掷圈。围绕在压缩圈范围以外至 R_2 的地带，其受到的爆破作用力虽较压缩圈范围内小，但介质原有的结构受到破坏，分裂成为各种尺寸和形状的碎块，而且爆破作用力尚有余力足以使这些碎块获得能量。如果这个地带的某一部分处在临空的自由面条件



下，破坏了了的介质碎块便会产生抛掷现象，因而叫做抛掷圈。

(3) 松动圈。松动圈又称破坏圈。在抛掷圈以外至 R_3 的地带，爆破的作用力更弱，除了能使介质结构受到不同程度的破坏外，没有余力可以使破坏了了的碎块产生抛掷运动，因而叫做破坏圈。工程上为了实用起见，一般还把这个地带被破碎成为独立碎块的一部分叫做松动圈，而把只是形成裂缝、互相间仍然连成整块的一部分叫做裂缝圈或破裂圈。

(4) 震动圈。在破坏圈范围以外，微弱的爆破作用力甚至不能使介质产生破坏。这时介质只能在应力波的作用下，产生振动现象，这就是图 1-1 中 R_4 所包括的地带，通常叫做震动圈。震动圈以外爆破作用的能量就完全消失了。

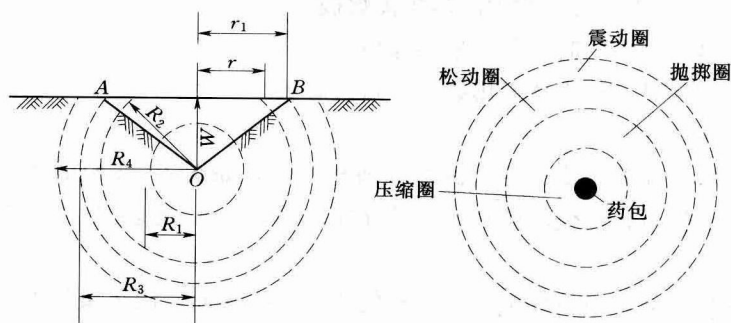


图 1-1 爆破作用圈示意图

2. 爆破漏斗

在有限介质中爆破，当药包埋设较浅，爆破后将形成以药包中心为顶点的倒圆锥形爆破坑，称之为爆破漏斗。爆破漏斗的形状多种多样，随着岩土性质、炸药品种性能和药包大小及药包埋置深度等不同而变化。

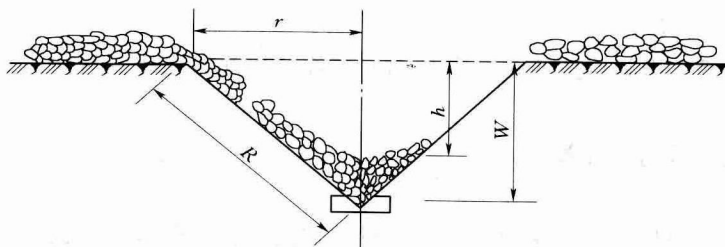


图 1-2 爆破漏斗

r —爆破漏斗半径； R —爆破作用半径； W —最小抵抗线； h —漏斗可见深度

3. 最小抵抗线

由药包中心至自由面的最短距离。如图 1-2 中的 W 。

4. 爆破漏斗半径

爆破漏斗半径即在介质自由面上的爆破漏斗半径，如图 1-2 中的 r 。



5. 爆破作用指数

爆破作用指数指爆破漏斗半径 r 与最小抵抗线 W 的比值。即：

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

爆破作用指数的大小可判断爆破作用性质及岩石抛掷的远近程度，也是计算药包量、决定漏斗大小和药包距离的重要参数。一般用 n 来区分不同爆破漏斗，划分不同爆破类型。

- (1) 当 $n=1.0$ 时，称为标准抛掷爆破。
- (2) 当 $n>1.0$ 时，称为加强抛掷爆破。
- (3) 当 $0.75<n<1.0$ 时，称为减弱抛掷爆破。
- (4) 当 $0.33<n\leq 0.75$ 时，称为松动爆破。
- (5) 当 $n\leq 0.33$ 时，称为药壶爆破或隐藏式爆破。

6. 可见漏斗深度 h

经过爆破后所形成的沟槽深度叫做可见漏斗深度，如图 1-2 中的 h ，它与爆破作用指数大小、炸药的性质、药包的排数、爆破介质的物理性质和地面坡度有关。

7. 自由面

自由面又称临空面，指被爆破介质与空气或水的接触面。同等条件下，临空面越多炸药用量越小，爆破效果越好。

8. 二次爆破

二次爆破指大块岩石的二次破碎爆破。

9. 破碎度

破碎度指爆破岩石的块度或块度分布。

10. 单位耗药量

单位耗药量指爆破单位体积岩石的炸药消耗量。

11. 炸药换算系数

炸药换算系数 e 指某炸药的爆炸力 F 与标准炸药爆炸力之比（目前以 2 号岩石铵梯炸药为标准炸药）。

三、药包及其装药量计算

1. 药包

为了爆破某一物体而在其中放置一定数量的炸药，称为药包。药包的分类及使用可见表 1-1。

表 1-1 药包的分类及使用

分类名称	药包形状	作用效果
集中药包	长边小于短边 4 倍	爆破效率高，省炸药和减少钻孔工作量，但破碎岩石块度不够均匀。多用于抛掷爆破
延长药包	长边超过短边 4 倍。延长药包又有连续药包和间隔药包两种形式	可均匀分布炸药，破碎岩石块度较均匀。一般用于松动爆破



2. 装药量计算

爆破工程中的炸药用量计算，是一个十分复杂的问题，影响因素较多。实践证明，炸药的用量是与被破碎的介质体积成正比的。而被破碎的单位体积介质的炸药用量，其最基本的影响因素又与介质的硬度有关。目前，由于还不能较精确的计算出各种复杂情况下的相应用药量，所以一般都是根据现场试验方法，大致得出爆破单位体积介质所需的用药量，然后再按照爆破漏斗体积计算出每个药包的装药量。

药包药量的基本计算公式是

$$Q = KV \tag{1-2}$$

式中 K ——爆破单位体积岩石的耗药量，简称单位耗药量， kg/m^3 ；

V ——标准抛掷漏斗内的岩石体积， m^3 。

需要注意的是，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。常见岩土的标准单位耗药量见表 1-2。

其中

$$V = \frac{\pi}{3} W^3$$

故标准抛掷爆破药包药量计算公式 (1-2) 可以写为

$$Q = KW^3 \tag{1-3}$$

对于加强抛掷爆破

$$Q = (0.4 + 0.6n^3)KW^3 \tag{1-4}$$

对于减弱抛掷爆破

$$Q = \left(\frac{4 + 3n}{7}\right)^3 KW^3 \tag{1-5}$$

对于松动爆破

$$Q = 0.33KW^3 \tag{1-6}$$

式中 Q ——药包重量， kg ；

W ——最小抵抗线， m ；

n ——爆破作用指数。

表 1-2 单位耗药量 K 值

岩石种类	K (kg/m^3)	岩石种类	K (kg/m^3)
黏土	1.0~1.1	砾岩	1.4~1.8
坚实黏土、黄土	1.1~1.25	片麻岩	1.4~1.8
泥灰岩	1.2~1.4	花岗岩	1.4~2.0
页岩、板岩、凝灰岩	1.2~1.5	石英砂岩	1.5~1.8
石灰岩	1.2~1.7	闪长岩	1.5~2.1
石英斑岩	1.3~1.4	辉长岩	1.6~1.9
砂岩	1.3~1.6	安山岩、玄武岩	1.6~2.1
流纹岩	1.4~1.6	辉绿岩	1.7~1.9
白云岩	1.4~1.7	石英岩	1.7~2.0

- 注
1. 表中数据是以 2 号岩石铵梯炸药作为标准计算，若采用其他炸药时，应乘以炸药换算系数 e ，见表 1-3。
 2. 表中数据，是在炮眼堵塞良好的情况下确定出来的，如果堵塞不良，则应乘以 1~2 的堵塞系数。对于黄色炸药等烈性炸药，其堵塞系数不宜大于 1.7。
 3. 表中 K 值是指一个自由面的情况。如果自由面超过 1 个，应按表 1-4 适当减少用药量。

表 1-3 炸药换算系数 e 值表

炸药名称	型号	换算系数 e	炸药名称	型号	换算系数 e
岩石铵梯	1号	0.91	煤矿铵梯	1号	1.10
岩石铵梯	2号	1.00	煤矿铵梯	2号	1.28
岩石铵梯	2号抗水	1.00	煤矿铵梯	3号	1.33
露天铵梯	1号	1.04	煤矿铵梯	1号抗水	1.10
露天铵梯	2号	1.28	梯恩梯	三硝基甲苯	0.86
露天铵梯	3号	1.39	62%硝化甘油	—	0.75
露天铵梯	1号抗水	1.04	黑火药	—	1.70

表 1-4 自由面与用药量的关系

自由面数	减少药量百分数 (%)	自由面数	减少药量百分数 (%)
2	20	4	40
3	30	5	50

注 表中自由面的数目是按方向(上、下、东、南、西、北)确定的,不是按被爆破体的几何形体确定的。

四、爆破的分类

爆破可按爆破规模、凿岩情况、要求等不同进行分类。

(1) 按爆破规模分,爆破可分为小爆破、中爆破、大爆破。

(2) 按凿岩情况分,爆破可分为浅孔爆破、深孔爆破、药壶爆破、洞室爆破、二次爆破。

(3) 按爆破要求分,爆破可分为松动爆破、减弱抛掷爆破、标准抛掷爆破、加强抛掷爆破及定向爆破、光面爆破、预裂爆破、特殊物爆破(冻土、冰块等)。

第二节 爆破材料

炸药与起爆材料均属爆破材料。炸药是破坏介质的能源,而起爆材料则使炸药能够安全、有效地释放能量。

一、炸药

(一) 炸药的基本性能

1. 威力

炸药的威力用炸药的爆力和猛度来表征。

(1) 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。

(2) 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。

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。对一定量的炸药，爆力越高，炸除的体积越多；猛度越大，爆后的岩块越小。

2. 爆速

爆速是指爆炸时爆炸波沿炸药内部传播的速度。爆速测定方法有导爆索法、电测法和高速摄影法。

3. 殉爆

炸药爆炸时引起与它不相接触的邻近炸药爆炸的现象叫殉爆。殉爆反应了炸药对冲击波的感度。主发药包的爆炸引爆被发药包爆炸的最大距离称为殉爆距离。

4. 感度

感度又称敏感度，是炸药在外能作用下起爆的难易程度，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。不同的炸药在同一外能作用下起爆的难易程度是不同的，起爆某炸药所需的外能小，则该炸药的感度高；起爆某炸药所需的外能高，则该炸药的感度低。炸药的感度对于炸药的制造加工、运输、贮存、使用的安全十分重要。感度过高的炸药容易发生爆炸事故，而感度过低的炸药又给起爆带来困难。工业上大量使用的炸药一般对热能、撞击和摩擦作用的感度都较低，通常要靠起爆能来起爆。

5. 炸药的安定性

炸药的安定性指炸药在长期贮存中，保持原有物理化学性质的能力。

(1) 物理安定性。物理安定性主要是指炸药的吸湿性、挥发性、可塑性、机械强度、结块、老化、冻结、收缩等一系列物理性质。物理安定性的大小，取决于炸药的物理性质。如在保管使用硝化甘油类炸药时，由于炸药易挥发收缩、渗油、老化和冻结等导致炸药变质，严重影响保管和使用的安全性及爆炸性能。铵油炸药和矿岩石硝铵炸药易吸湿、结块，导致炸药变质严重，影响使用效果。

(2) 化学安定性。化学安定性取决于炸药的化学性质及常温下化学分解速度的大小，特别是取决于贮存温度的高低。有的炸药要求储存条件较高，如5号浆状炸药要求不会导致硝酸铵重结晶的库房温度是 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，而且要求通风良好。

炸药有效期取决于安定性。贮存环境温度、湿度及通风条件等对炸药实际有效期影响巨大。

6. 氧平衡

氧平衡是指炸药在爆炸分解时的氧化情况。根据炸药成分的配比不同，氧平衡具有以下3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稳定的 CO_2 、 H_2O 和 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 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 CO₂。如三硝基甲苯（梯恩梯）的爆炸反应属负氧平衡反应。

由以上 3 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力求零氧平衡或微量正氧平衡，避免负氧平衡。

(二) 工程炸药的种类、品种及性能

1. 炸药的分类

炸药按组成可分为化合炸药和混合炸药；按爆炸特性分类有起爆药、猛炸药和火药；按使用部门分类有工业炸药和军用炸药。在工程爆破中，用来直接爆破介质的炸药（猛炸药）几乎都是混合炸药，因为混合炸药可按工程的不同需要而配制。它们具有一定的威力，较敏感，一般需用 8 号雷管起爆。

2. 常用炸药

我国水利水电工程中，常用的炸药为铵梯炸药、铵油炸药和乳化炸药。

(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。硝酸铵是铵梯炸药的主要成分，其性能对炸药影响较大；梯恩梯是单质烈性炸药，具有较高的敏感度，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。铵梯炸药的摩擦、撞击感度较低，故较安全。

在工程爆破中，以 2 号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 号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。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。其贮存期仅为 7~15d，一般是在工地配药即用。

(3) 乳化炸药。乳化炸药以氧化剂（主要是硝酸铵）水溶液与油类经乳化而成的油包水型胶体作爆炸性基质，再加以敏化剂、稳定剂等添加剂而成为一种乳脂状炸药。

乳化炸药与铵梯炸药比较，其突出优点是抗水。两者成本接近，但乳化炸药猛度较高，临界直径较小，仅爆力略低。

二、起爆器材

起爆材料包括雷管、导火索和传爆线等。

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。