

张志呈 王 刚 杜云贵 编著

爆破原理与设计



重庆大学出版社

中国矿业大学北京 中国矿业大学徐州 中国矿业大学青岛 中国矿业大学银川

爆破原理与设计



中国矿业大学北京 中国矿业大学徐州 中国矿业大学青岛 中国矿业大学银川

爆破原理与设计

张志呈 王 刚 杜云贵 编著

重 庆 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书共分14章,全面、系统地阐述了爆破工程的基本理论、基本概念和目前在工业生产、民用建筑等方面广泛采用的各种爆破技术的基本原理和参数设计方法。内容包括露天台阶爆破、硐室爆破、地下爆破、光面爆破和预裂爆破、切槽孔定向成缝爆破、水下爆破、拆除爆破、特殊控制爆破、起爆技术和爆破网路以及爆破安全技术及其防护问题。

书中切槽孔定向成缝爆破一章,是作者近年来科研成果的总结,在同类著作中尚属首次出现。

本书可作为高等学校矿业类、土建类等有关专业的教材,也可供各部门工程爆破设计研究人员以及施工人员参考。

爆破原理与设计

张志呈 王 刚 杜云贵 编著

责任编辑 饶邦华 李长惠

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

中国人民解放军重庆通信学院印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16印张: 12 字数: 200 千

1992年7月第1版 1992年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—3000

标准书号: ISBN 7-5624-0500-X
TD·7 定价: 5.96元

(川)新登字020号

序 言

改革开放以来，我国国民经济建设正以突飞猛进的速度向前发展。爆破事业也不例外，在工程实践中取得了许多先进经验，不论是爆破器材，还是爆破技术，都在不断出现新的成果，其中有的达到甚至领先于世界先进水平，这是国内爆破同行值得欢欣鼓舞的。但是，这些宝贵的经验，大多还只见于零散的论文报道，系统的论述和可供同行参考学习的书籍还很少见到。

张志呈教授等，将多年积累的研究成果和实践经验编著成册，从理论到实际都作了提纲性的介绍，给爆破工作者提供了比较系统、比较全面地了解我国爆破事业发展现状的机会，并在实际工作中可以参考使用，节约了时间。无疑，这本书的出版发行，不论是在教学、科研，还是在实际参考方面，都将起到它应有的作用。

从本书编写的内容可以看到，作者对有关的爆破理论、爆破技术、爆破设计方法、计算参数和安全技术等方面都有所涉及，既可作参考书，又可作为查找资料的工具书，对广大读者定会有所帮助。

应本书作者张志呈教授的要求，当此出版发行之际，乐于向我国爆破同行竭诚推荐，故为之序。

冯叔瑜

1991年9月

前 言

火药的发明已有1330多年的历史，北宋时期就有利用火药的爆炸能量破碎岩石（即热力破碎）的记载，至今已有几百年的历史。20世纪50年代以来，我国工程爆破的应用已深入到国民经济建设的各个领域，工程爆破已达到一次起爆药量以万吨计的规模。新型乳化炸药和其它抗水型炸药的研制，无起爆药雷管的发明，非电毫秒雷管和非电塑料导爆管网路的联接和起爆方法的研究已进入世界先进行列。爆破器材的发展对爆破技术的变革和创新起着推动作用。近年来，拆除爆破已成为工程爆破的重要分支；光面爆破、预裂爆破、深孔微差挤压爆破、深孔掘进爆破等爆破技术都取得了新的进展；洞室条形药包爆破法初步显示出良好的爆破效果；水下爆破、水压爆破、爆破成沟等爆破技术也取得了新的成果；定向爆破筑坝的方法已用于构筑尾矿坝、蓄水坝、拦截泥石流坝等各种坝体。近几年来，已开始采用岩土爆破作用的模型实验和动光弹试验技术研究爆破现象和规律，尤其是计算机辅助工程爆破设计的研究工作，在优化设计、岩块预测以及爆破破坏影响的分析等方面取得了一定的进展。

新的爆破安全仪表的出现，进一步提高了爆破工艺的安全性和工程爆破的准确性。对各类爆破所产生的有害效应的研究逐年深化。

总之，我国的爆破技术及科研水平已进入世界先进行列。

作者深感在工程爆破技术得以广泛应用和飞速发展的今天，尚缺乏一本简明、全面地论述各种常用工程爆破技术及其基础理论的参考书，对工程爆破技术的新发展缺乏总结。为此，我们发挥集体力量写成了这本书。

全书共分14章。第一、二章综述了有关的工程爆破基础理论，第三章至第十一章论述了多年来出现的许多行之有效的工程爆破方法的原理及参数设计原则，其中切槽孔定向成缝爆破一章，是作者近十年来理论研究和现场实践成果的总结，也是国内首次将这一近年才发展起来的新技术编入有关工程爆破技术的书籍中；第十二、十三和十四章论述了爆破安全及其防护技术，为安全生产和防护设计提供了必要的参考资料。

本书可作为冶金矿山、煤炭、化工、建材、铁道、交通运输、水利水电、地质、石油、农田基建、城市建设和国防工程等部门的爆破工程技术人员的参考书，也可作为矿业、地质勘探、工程建筑、岩土工程和水利工程等专业的教材或参考书，同时也可供有关院校和设计研究单位的教师、研究生和设计研究人员参考。

本书的第三、四、八、九章由张志呈执笔，第十二、十三章由王刚执笔，第一、二章由杜云贵执笔，第五、六章由郭学彬执笔，第七章由张志呈、杜云贵编写，第十章由张志呈、王刚编写，第十一章由王刚、张志呈编写，第十四章由郭学彬、王刚编写。全书由杜云贵和张志呈统稿。

重庆大学姜修尚教授、李通林教授审校了本书全稿，中国力学学会工程爆破专业委员会副主任委员、铁道科学研究院冯叔瑜教授为本书作了序。他们均为本书提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之时间仓促。本书难免存在错误、缺点，热诚希望读者、同仁给予

指正，以便加以修改和补充。

作者

1991年9月

目 录

第一章 导论	(1)
第一节 岩石的可爆性及其分级.....	(1)
第二节 爆破器材.....	(4)
第三节 爆炸应力波在岩体中的传播.....	(10)
第二章 岩石爆破破碎机理	(20)
第一节 岩石爆破破坏原因的几种假说及评述.....	(20)
第二节 集中药包爆破作用分析.....	(21)
第三节 成组药包的爆破作用.....	(25)
第四节 爆破漏斗.....	(26)
第五节 装药量计算原理.....	(29)
第六节 影响爆破效果的因素.....	(31)
第三章 露天台阶爆破	(35)
第一节 爆破参数的选择.....	(35)
第二节 微差爆破.....	(38)
第三节 留碴爆破.....	(40)
第四节 台阶爆破的深孔布置方式和起爆顺序.....	(42)
第五节 装药、堵塞和起爆.....	(45)
第四章 硐室爆破	(49)
第一节 硐室爆破的原理与设计.....	(49)
第二节 抛掷爆破.....	(51)
第三节 定向爆破.....	(56)
第四节 松动药室爆破.....	(60)
第五节 条形药包爆破.....	(62)
第六节 硐室爆破装药与堵塞.....	(65)
第五章 地下爆破	(66)
第一节 掘进爆破.....	(66)
第二节 地下采场爆破.....	(75)
第六章 光面爆破和预裂爆破	(85)
第一节 概述.....	(85)
第二节 预裂爆破.....	(85)
第三节 光面爆破.....	(88)
第七章 切槽孔定向成缝爆破	(92)
第一节 切槽孔爆破的力学机理.....	(92)
第二节 切槽孔爆破设计原理.....	(95)
第三节 爆破参数选择.....	(97)
第八章 水下爆破	(100)
第一节 水下爆破作用的特点和分类.....	(100)

第二节	水下爆破设计参数的选择	(101)
第三节	水下爆破施工	(105)
第九章	拆除爆破	(108)
第一节	烟囱与水塔的拆除爆破	(108)
第二节	钢筋混凝土框架拆除爆破	(114)
第三节	高层楼房拆除爆破	(118)
第四节	梁、柱、墙拆除爆破	(122)
第五节	基础爆破	(124)
第六节	水压拆除爆破	(127)
第十章	特殊控制爆破	(135)
第一节	静态破碎剂破碎岩石	(135)
第二节	成沟爆破	(138)
第三节	高温拆除炉内结块	(142)
第四节	聚能爆破	(144)
第十一章	起爆技术和爆破网路	(148)
第一节	起爆方式	(148)
第二节	起爆方法	(148)
第十二章	爆破安全距离的确定	(154)
第一节	飞石安全距离及防护 *	(154)
第二节	地震波安全距离的确定	(156)
第三节	爆破冲击波的安全距离	(160)
第四节	有毒气体的安全距离	(165)
第十三章	爆破器材性能检测	(167)
第一节	炸药性能检测	(167)
第二节	起爆器材的性能检测	(171)
第十四章	爆破事故的预防及处理	(174)
第一节	炸药意外燃烧与爆炸事故	(174)
第二节	早爆事故	(175)
第三节	缓爆事故	(176)
第四节	盲炮、残药的预防及其处理	(177)
第五节	爆破引起的瓦斯煤尘爆炸事故	(178)

第一章 导 论

利用炸药爆炸时迅速释放出来的巨大能量使岩石或其它物体破坏的过程称为爆破。爆破是采矿、隧道与地下硐室开挖、路堑开挖和废旧建筑物拆除等工程中的一种重要手段。

第一节 岩石的可爆性及其分级

岩石的可爆性是指岩石对爆破作用的抵抗能力或爆破岩石的难易程度，它是岩石本身的一种内在特性，是岩石物理力学性质和爆破工艺的综合反映，其具体表现又往往和爆破效

表1-1 普氏岩石分级表

等 级	坚固程度	岩 石 名 称	f
I	最 坚 固	最坚固、细致和有韧性的 <u>石英岩</u> 和 <u>玄武岩</u> 及其它各种特别坚固的岩石	20
II	很 坚 固	很坚固的 <u>花岗质岩石</u> ， <u>石英斑岩</u> ，很坚固的 <u>花岗岩</u> ， <u>硅质片岩</u> ，比上一级较不坚固的 <u>石英岩</u> ， <u>最坚固的砂岩和石灰岩</u>	15
III	坚 固	<u>花岗岩(致密的)</u> 和 <u>花岗质岩石</u> ，很坚固的 <u>砂岩和石灰岩</u> ， <u>石英质矿脉</u> ，坚固的 <u>砾岩</u> ，极坚固的 <u>铁矿</u>	10
III.	坚 固	<u>石灰岩(坚固的)</u> ，不坚固的 <u>花岗岩</u> ，坚固的 <u>砂岩、大理岩、白云岩</u> ， <u>黄铁矿</u>	8
IV	较 坚 固	一般的 <u>砂岩</u> ， <u>铁矿</u>	6
IV.	较 坚 固	<u>砂质页岩</u> ， <u>页岩质砂岩</u>	5
	中 等	坚固的 <u>粘土质岩石</u> ，不坚固的 <u>砂岩和石灰岩</u>	4
V.	中 等	各种 <u>页岩(不坚固的)</u> ，致密的 <u>泥灰岩</u>	3
VI	较 软 弱	较软弱的 <u>页岩</u> 、很软弱的 <u>石灰岩</u> 、 <u>白垩</u> 、 <u>岩盐</u> 、 <u>石膏</u> 、 <u>冻土</u> 、 <u>无烟煤</u> 、 <u>普通泥灰岩</u> 、 <u>裂隙发育的砂岩</u> 、 <u>胶结砾石</u> 、 <u>岩质土壤</u>	2
VI.	较 软 弱	<u>碎石质土壤</u> 、 <u>裂隙发育的页岩</u> 、 <u>凝结成块的砾石和碎石</u> 、 <u>坚固的煤</u> 、 <u>硬化的粘土</u>	1.5
VII	软 弱	致密的 <u>粘土</u> 、软弱的 <u>烟煤</u> 、坚固的 <u>冲积层</u> 、 <u>粘土质土壤</u>	1.0
VII.	软 弱	轻砂质 <u>粘土</u> 、 <u>黄土</u> 、 <u>砾石</u>	0.8
VIII	土 质 岩 石	<u>腐植土</u> 、 <u>泥煤</u> 、 <u>轻砂质土壤</u> 、 <u>湿砂</u>	0.6
IX	松散性岩石	<u>砂</u> 、 <u>山坡堆积</u> 、 <u>细砾石</u> 、 <u>松土</u> 、 <u>采出的煤</u>	0.5
X	流砂性岩石	<u>流砂</u> 、 <u>沼泽土壤</u> 、 <u>含水黄土</u> 及其他 <u>含水土壤</u>	0.3

果、生产过程密切相关。由于岩石是爆破作业的主要对象，因此研究岩石的可爆性及其分级具有十分重要的现实意义。但是，迄今为止仍然没有一种国际上公认的、统一的可爆性分级方法。下面对几种岩石可爆性评价和分级法作一简单介绍。

一、 普氏岩石坚固性系数分级

苏联的M·M·普洛托吉雅柯诺夫教授用岩石单轴抗压强度 S_c 的1/100来表示岩石的坚固性，并把它称为岩石的坚固性系数 f （即 $f = S_c/100$ ）。普氏根据 f 值将岩石分为10级， f 值越大，岩石越坚固。表1-1给出了岩石的普氏分级。

二、 岩石的爆破性指数分级

我国东北工学院采矿系以能量平衡为准则，用反映标准条件下现场爆破试验的岩石爆破漏斗体积、爆破岩石块度分布率和岩体波阻抗的综合指标——岩石爆破性指数 N 作为岩石可爆性分级的依据⁽¹⁾：

$$N = \ln \left[\frac{e^{67.22} K_{\max}^{7.42} \cdot 1.01(\rho, C_p)^{2.03}}{e^{38.44/V_K} \cdot K_{\min}^{4.76} \cdot K_{cp}^{1.69}} \right]$$

其中， ρ 为岩石密度（g/cm³）； C_p 为岩体中的纵波速度（m/s）； V_K 为爆破漏斗体积（m³）； $K_{\max}$ 为爆破漏斗岩石大块率，即大于300mm的岩块率（%）； $K_{\min}$ 为爆破漏斗的小块率，即小于50mm的岩块率（%）； K_{cp} 为平均合格率，即50~100mm、100~200mm和200~300mm的块度累计平均值（%）。

根据 N 值的大小，将岩石的爆破性分为5级，每级又分为2个亚级，见表1-2。

表1-2 岩石爆破性指数分级

爆破等级		N	爆破程度	代 表 性 岩 石
I	I ₁	<29	极 易 爆	千枚岩，破碎性砂岩，泥质板岩，破碎性白云岩
	I ₂	29.001~38.000		
II	II ₁	38.001~46.000	易 爆	角砾岩、绿泥岩、米黄色白云岩
	II ₂	46.001~53.000		
III	III ₁	53.001~60.000	中 等	阳起石石英岩、煌斑岩、大理岩、灰色白云岩
	III ₂	60.001~68.000		
IV	IV ₁	68.001~74.000	难 爆	磁铁石英岩，角闪斜长片麻岩
	IV ₂	74.001~81.000		
V	V ₁	81.001~86.000	极 难 爆	砂卡岩，花岗岩，矿体浅色砂岩
	V ₂	>86		

三、 岩体统一分类

岩体由岩石和结构面两部分组成。对于采掘或开挖工作来说，岩石的矿物结构特征所反映的岩石物理力学性能和结构面存在状态所反映的岩体结构特征，直接影响着开挖的难易程度、边坡（路基）和坑硐围岩的稳定性。因此，岩石的可钻性、可爆性、可采掘性、坚固性

表 1-3 岩体统一分类表

岩体质量指标		岩体坚硬程度	岩体工程性质					代表性岩石			
统一类别	Q _n		f	稳定性		可钻性	爆破性				
				净宽3~5m巷道自稳时间	凿岩比功(kg·m/cm ²)		标准条件下纯岩钻进速度(mm/min)		2. 硝铵炸药消耗量(kg/m ³)	标准抛掷爆破消耗量(kg/m ³)	
											N
I	90~100	坚硬	≥18	长	期	>70	≤75	≥3.8~5.3	≥2.2~2.5	>86	砂卡岩, 磁铁岩, 细晶石英岩, 玄武岩, 安山岩, 玢岩
II	75~90	硬	14~18	稳定	稳定	60~70	90~110	2.4~3	2.0~2.2	81.001~86	中细粒伟晶岩, 角闪岩, 角闪辉长岩, 花岗岩, 块体钾微斜长岩
III			10~14	稳定	≥5年	55~60	110~130	2~2.4	1.8~2.0	74.001~81	钠长石, 石英岩, 大理岩, 正长岩, 辉绿岩, 辉长岩, 坚硬砂岩和石灰岩
IV	55~75	中硬	6~10	中等稳定	2~5年	50~55	130~140	1.5~2	1.7~1.8	68.001~74	致密砂岩, 白云岩, 石灰岩, 大理石, 黄铁矿
V			5~6	中等稳定	1年左右	45~50	160~200	1.25~1.5	1.6~1.7	60.001~68	风化辉长岩, 粗面岩, 铁矿, 砂岩
VI	30~55	软	4~5	稳定性差	1~几个月	40~45	200~250	1.0~1.25	1.5~1.6	53.001~60	霞石磷灰石矿, 滑石蛇纹石片岩, 砂质页岩, 页岩质砂岩
七			8~4	稳定性差	1个月左右	30~40	250~300	0.8~1.0	1.4~1.5	46.001~53	严重风化辉长岩, 片状砂岩, 绿泥石片岩, 坚硬粘土质页岩
八	<30	很软	2~3	不稳定	几天至十几天	25~30	300~370	0.6~0.8	1.3~1.4	38.001~46	各种页岩, 致密泥灰岩, 冻土
九			1~2	不稳定	1~几天	20~25	370~500	0.4~0.6	1.2~1.3	29.001~38	褐煤, 千枚岩, 云母片岩, 软页岩, 白垩, 岩盐
V	<30	软	<1	稳定	几小时或应立即支护	<20	500~600	0.3~0.4	≤1.1~1.2	<29	砂页岩, 凝灰岩, 风化褐煤, 致密粘土

和开挖面的稳定性等工程特性所反映出来的不同结果，表征了岩体质量的差异，即岩体工程类别表征了岩体质量的基本函数。

四川建材学院张志呈教授根据岩体质量指标与工程类别分级的相关性的多方面试验研究，建立了岩体质量指标与分类的计算公式*：

$$Q_m = K_{AB} + Qr + K_{AD} M_c$$

其中， Q_m 为岩体质量指标分数； K_{AB} 为岩体完整性分级评分数，包括5m岩石段裂隙系数的平均值、岩体完整性系数和岩芯复原率； Qr 为岩石质量指标，包括单轴抗压强度、纵横波速比值、岩石纵波速度和风化系数； M_c 为修正系数， $M_c = c_1 + c_2 + c_3$ ， c_1 、 c_2 、 c_3 分别表征岩体结构面状态、涌水情况和应力状态； K_{AD} 为工程类别相关性系数，凿岩、爆破、采掘时 $K_{AD} = 0$ ，井巷工程、露天边坡工程中 $K_{AD} = 1$ 。

岩体质量指标 Q_m 值从0~100之间的变化，反映了岩体质量从坏到好的变化。按 Q_m 值的大小，将岩体分为5类10级，见表1-3。

关于岩石可爆性评价准则及其分级，国内外还有很多方法，如苏联矿山企业普遍采用的五级可爆性分级法，以可钻性表征可爆性的方法等。寻求一种简单易行、经济合理的岩石可爆性评价准则，仍是一项很重要的任务。

第二节 爆破器材

本节主要介绍炸药、雷管、导火索、导爆索、导爆管等爆破材料的种类、性能和用途。

一、爆炸及炸药的基本概念

1. 爆炸 爆炸是物质系统一种极其迅速的物理或化学变化，常伴随有强烈的发光、声响和破坏效应。爆炸有物理爆炸、化学爆炸和核爆炸三类。物理爆炸是物质物理状态的变化，如锅炉和车胎爆炸；而化学爆炸前后物质的分子组成发生了变化，如炸药爆炸、瓦斯或煤尘爆炸等。目前在工业生产中主要是利用炸药的化学爆炸。

2. 炸药 凡是能发生化学爆炸的物质，并不都是有实际工业用途的炸药。现代炸药只包括其中的一部分单质或混合物，它们的共同特点是：相对稳定，化学反应速度快，能产生大量气体和热量，同时伴有声、光现象。显然，如果没有足够外加能量的激发，炸药是不会自动爆炸的，否则其安全性就得不到保障。因此，可将凡是在足够外力作用下能产生高速化学反应，并产生大量气体和热量的物质称为炸药。

3. 炸药的热化学参数

(1) 爆热 炸药爆炸反应时所放出的热量称为爆热，其单位为J/kg。爆轰波的传播要靠反应区化学反应释放出来的热量来维持，因此，爆热对稳定传爆的作用是极其重要的。

(2) 爆容 单位质量的炸药爆炸后产生的气体产物在标准状态下的体积称为炸药的爆容，它是与炸药作功能力有关的一个重要参数。

(3) 爆温 炸药爆炸是放热反应。爆温是指炸药爆炸瞬间所放出的热量将爆炸产物加热到的最高温度，它取决于炸药爆热和爆炸产物的组成。

(4) 爆压 指炸药爆炸瞬间高温气体在未向外膨胀作功之前所达到的流体最大静压力。

* 详见《非金属矿》，1986，第1期。

二、炸药的起爆与传爆

引起炸药爆炸的过程称为起爆。能够引爆炸药的起爆能有热能、机械能和爆炸能三种。工程爆破常用的是爆炸能起爆，即一种炸药爆炸的能量引爆另一种炸药，它与机械能起爆过程类似。由于爆炸引起的瞬间强烈冲击作用，首先在局部炸药中形成“灼热核”，并由此而瞬间转化为全部炸药的爆炸。

接触起爆器材的那部分炸药周围受到起爆元件爆炸作功的强烈压缩，压力由常压突跃式增加，致使这部分炸药发生急剧的化学变化，产生大量的爆炸气体和热量；该爆炸气体又强烈地压缩其前方邻近的局部（簿层）炸药，并同样引起新的急剧化学变化，如此反复进行，爆炸反应即沿药包以固有速度自一端向另一端传播。炸药由起爆开始到爆轰终了的全过程称为传爆。

三、炸药的爆轰理论

爆轰是炸药爆炸的基本形式，研究炸药的爆轰，是为了了解炸药爆炸过程及其规律性，以便合理地使用炸药。

1. 冲击波

(1) 扰动与波 由于外来的作用，引起介质的状态（压力、密度、温度）发生局部改变的过程称为扰动。扰动在介质中的传播称为波。

(2) 压缩波与膨胀波（稀疏波） 当活塞在管中从一端向另一端推进时，靠近活塞的一层气体受到压缩，此种压缩逐层传递下去就形成了压缩波，压缩波波阵面上介质压力、密度和温度等均升高。当活塞从管中拉出时，气体沿原来推进的相反方向流动，使气体压力、密度和温度降低，这样逐层传播下去就形成膨胀波，膨胀波波阵面上介质压力、密度和温度等均减小。

(3) 冲击波 冲击波是一种特殊的压缩波。一般的压缩波压力是连续升高的，而冲击波在介质中传播时，压力是突然跃升的。即当压缩波的波阵面是个突跃面，波阵面上的压力、密度、温度和介质运动速度等参数都突跃升高时，这个压缩波就是冲击波。

2. 爆轰波 炸药中由冲击波的传播而引起的爆炸反应叫做爆轰。爆轰是炸药化学反应的一种形式，爆轰过程就是一个带化学反应的冲击波在炸药中的传播过程，爆轰波就是一种在炸药中传播的特殊形式的冲击波。爆轰波与一般冲击波的不同点是在其传播过程中不断从炸药化学反应中获得能量补充，保持恒定的波阵面压力和速度而稳定地传播，而一般的冲击波在其自由传播过程中，波阵面压力及波速即行衰减，不能维持稳定传播。

根据理论推导，爆轰波压力（ p_2 ）、爆轰产物运动速度（ u_2 ）及爆轰结束瞬间爆轰产物密度（ ρ_2 ）与炸药密度（ ρ_0 ）和爆速（ D_c ）之间存在下列关系：

$$p_2 = \frac{1}{2} \rho_0 D_c^2, \quad \rho_2 = \frac{4}{3} \rho_0, \quad u_2 = \frac{1}{4} D_c$$

3. 稳定爆轰的条件 通常说的爆轰包括稳定和 unstable 爆轰两种形式，稳定爆轰是指爆轰过程的传播速度保持不变。

爆轰波后面紧跟着一个高速化学反应区，该反应区的末端平面称为C-J面，冲击波阵面和紧附其后的化学反应区合起来叫做爆轰波阵面。

爆轰波稳定传播的条件为：爆轰波波速 D_c' 等于C-J面处介质的质点运动速度 u_H 与该处音速 c_H 之和，即 $D_c = u_H + c_H$ 。

影响稳定传爆的因素有药包直径、药包外壳、装药密度、径向间隙和炸药粘度等。

四、 炸药爆炸产物及氧平衡

1. 炸药的爆炸产物 炸药通常由碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N) 4种元素组成,其功能是: C、H——可燃元素; O——助燃元素; N——载氧体。炸药的组成通式可写为: $C_aH_bO_cN_d$, 脚码 a 、 b 、 c 、 d 分别表示4种元素的原子数。

炸药的爆炸反应过程,实质上就是炸药中所包含的可燃元素和助燃元素在爆炸瞬间发生高速化学反应的过程,反应的结果是重新组合形成新的稳定产物,并放出大量的热量。形成的爆炸产物主要有 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 N_2 以及 O_2 、 H_2 、 C 、 NO 、 CH_4 等。这些爆炸产物的种类、数量以及热量的多少与炸药分子中包含的可燃元素和助燃元素有关。

2. 氧平衡 炸药的爆炸是瞬间完成的过程,它所需要的氧原子全部由本身提供。而爆炸反应究竟生成什么产物,也受到炸药中含氧量同碳、氢含量比例的影响。这就提出了一个氧平衡的问题。以 $C + O_2 \rightarrow CO_2$ 和 $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ 为例,即 a 摩尔的碳变成 CO_2 ,需要

$2a$ 摩尔的氧, b 摩尔的氢变成水,需要 $\frac{b}{2}$ 摩尔的氧。设炸药具有的氧原子摩尔数为 c , c

与 $(2a + \frac{b}{2})$ 的差值代表氧平衡的三种情况:

$$c - (2a + \frac{b}{2}) > 0 \quad \text{正氧平衡}$$

$$c - (2a + \frac{b}{2}) = 0 \quad \text{零氧平衡}$$

$$c - (2a + \frac{b}{2}) < 0 \quad \text{负氧平衡}$$

氧平衡用每克炸药中剩余或不足氧量的克数来表示。混合炸药的氧平衡计算式为:

$$Q_p = \frac{[c - (2a + \frac{b}{2})] \times 16}{M}$$

其中, M 为炸药的摩尔质量。

常见炸药和有关化合物的氧平衡可直接查表1-4。例如,硝酸铵的通式为 $H_4O_3N_2$,按上式计算或查表1-4得其氧平衡为 $+0.20g/g$;铵油炸药的配比为94%的硝酸铵和6%的轻柴油,查表得轻柴油的氧平衡为 $-3.428g/g$,则铵油炸药的氧平衡为:

$$Q_p = \frac{0.20 \times 94 + (-3.428) \times 6}{100} = -0.01768g/g$$

五、 起爆器材

常用的起爆器材有雷管、导火索、导爆索、继爆管、导爆管等。

1. 雷管

(1)火雷管 火雷管一般由管壳、加强帽和正副起爆药组成,如图1-1(a)所示。火雷管起爆炸药前首先要用导火索引爆。

(2)电雷管 电雷管需用电能起爆,它是电爆系统的主要部件,其结构与火雷管大体相

表1-4 一些炸药与物质的氧平衡

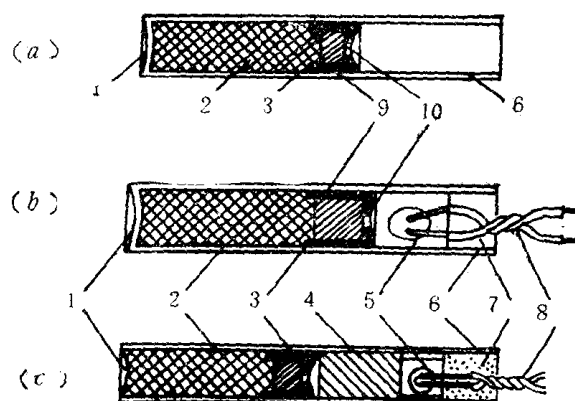
名 称	氧平衡 (g/g)	名 称	氧平衡 (g/g)
TNT	-0.740	木粉 (锯屑)	-1.370
二硝基甲苯	-1.144	沥 青	-2.890
二硝基苯	-0.563	石 蜡	-3.450
二硝基萘	-1.394	松 香	-2.810
太 安	-0.101	豆 饼 粉	-1.520
黑 索 金	-0.216	棉籽饼粉	-1.520
特 屈 儿	-0.474	纤维素	-1.185
雷 汞	-0.113	轻柴油	-3.428
硝化甘油	+0.035	重柴油	-3.270
硝化乙二醇	0	煤油	-3.430
硝化二乙二醇	-0.408	木炭	-2.667
硝棉 (含氮12.2%)	-0.372	煤 (含炭86%)	-2.559
氯酸钾	+0.392	硫磺	-1.000
过氯酸钾	+0.462	药包纸	-1.300
2* 岩石炸药	+0.034	铝	-0.890
硝 酸 铵	+0.200	硅	-1.140
硝 酸 钠	+0.470	硅铁 (含硅75%)	-0.963
硝 酸 钾	+0.396	92-4-4铵油炸药	-0.0016
二硝基重氮酚	-0.580	邻位硝基乙苯	-1.960
硝 酸	+0.760	重铬酸钾	+0.082
三硝基二甲苯	-0.896	62%硝化甘油炸药	+0.34
苦 味 酸	-0.454	硬脂酸钙	-2.750
抗水硝酸铵	+0.185		

图 1-1 雷管的构造图

(a) 火雷管; (b) 瞬发电雷管;

(c) 延发电雷管

- 1—聚能穴; 2—副起爆药; 3—正起爆药;
4—缓燃剂(或精制导火索); 5—电气点火装置;
6—雷管外壳; 7—密封胶; 8—脚线;
9—加强帽; 10—帽孔



似。通电后立即起爆的称为瞬发电雷管，如图1-1 (b) 所示；通电后需隔一段时间后才起爆的称为延发电雷管，如图1-1 (c) 所示。表1-5列出了部分常用国产雷管的参数，表1-6列出了国产延发电雷管的段别和延期时间。

表1-5 部分国产电雷管参数

雷管品种	桥丝材料及直径 (μm)	引火头	桥丝电阻 (Ω)	最大安全电流 (A)	最小发火电流 (A)	6毫秒发火电流 (A)	百毫秒发火电流 (A)	额定发火冲量 ($\text{A}^2 \cdot \text{ms}$)		桥丝熔化冲量 ($\text{A}^2 \cdot \text{ms}$)	传导时间 (ms)	20发准爆电流 (A)	制造厂
								上限	下限				
瞬发电雷管	康铜 50	桥丝直插 DDNP	0.73~0.98	0.35	0.425	1.65	0.75	19	9	56	2.1~4.9	1.5	阜新12厂
	锰白铜 50	桥丝直插 DDNP	0.79~1.14	0.325	0.425	1.50	0.775	13.2	8.4	45.6	-	-	淮北矿务局化工厂
	康铜 50	桥丝直插 DDNP	0.69~0.91	0.275	0.45	1.75	0.80	18.7	9.5	66.6	2.6~5.2	1.8	淄博矿务局525厂
	镍铬 40	桥丝直插 DDNP	1.6~3.0	0.15	0.2	0.7	0.35	2.9	2	10.3	2.4~4.3	0.8	峰峰607厂
秒延期电雷管	镍铬 40	药头式 氯酸钾:木炭:骨胶=80:20:8	2.3~3.3	0.25	0.425	1.15	0.575	7.9	5.3	14.5	2.3~5.6	0.9	开滦602厂
	镍铬 40	药头式 氯酸钾:木炭:骨胶:羧甲基纤维素=80:20:3:4	2.81~3.54	0.275	0.35	1.1	0.475	6.8	4.1	11.7	3.8~6.5	0.8	北京矿务局化工厂
毫秒延期电雷管	镍铬 40	药头式 氯酸钾:木炭:骨胶:羧甲基纤维素=76.4:23.6:4:1	2.6~3.1	0.25	0.4	1.1	0.575	7.3	4	13.2	1.9~4.2	0.9	大同矿务局化工厂
	镍铬 40	药头式 氯酸钾:木炭:骨胶:羧甲基纤维素=76.4:23.6:8:2	2.7~3.2	0.275	0.35	1.0	0.5	6	5	12	4.1~5.5	0.7	徐州矿务局化工厂

2. 导火索 导火索是一种以黑火药为药芯，外面缠以纸、棉、麻纤维和防潮层的绳索状点燃火雷管的配套材料。根据不同的燃烧速度可分为正常燃烧导火索 (110~130s/m) 和缓燃导火索 (180~210或240~350s/m)。

3. 导爆索 导爆索的结构与导火索类似，但其药芯是高猛炸药。国产导爆索采用黑索金或太安药芯。因此，导爆索不是用来传递火焰，而是用以传递爆炸冲能，直接起爆炸药。导爆索的传爆速度一般为6500~7000m/s。

4. 继爆管 继爆管实质上由不设点火装置的毫秒延期雷管和消爆管、导爆索三部分组成。它分为单索单向、双索单向和双索双向三类。单向继爆管有方向性，只能由消爆管端传向延期雷管端，使用时不能装反；双向继爆管则在消爆管两端都装有延期火雷管，可以实现双向传爆。表1-7列出了各类继爆管段别和延期时间。

5. 导爆管 导爆管是用半透明的高压聚乙烯材料制成的塑料软管，内壁涂有薄层高能