

岩石钻掘与防护教育部工程研究中心 资助
教育部科学技术研究重点项目

实用

爆破技术

SHIYONG BAOPU JISHU

肖汉甫 吴立 陈刚 李春军 袁兆龙 编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

岩土钻掘与防护教育部工程研究中心 资助
教育部科学技术研究重点项目

实用爆破技术

SHIYONG BAOPO JISHU

肖汉甫 吴 立 陈 刚 编著
李春军 袁兆龙



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

实用爆破技术/肖汉甫,吴立,陈刚,李春军,袁兆龙编著. —武汉:中国地质大学出版社,
2009.7

ISBN 978-7-5625-2382-6

- I. 实…
II. ①肖…②吴…③陈…④李…⑤袁…
III. 爆破技术-高等学校-教材
IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 128042 号

实用爆破技术

肖汉甫 吴立 陈刚 编著
李春军 袁兆龙

责任编辑:段连秀

策划编辑:段连秀

责任校对:林泉

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail: cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:406 千字 印张:15.75

版次:2009 年 7 月第 1 版

印次:2009 年 7 月第 1 次印刷

印刷:湖北地矿印业有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2382-6

定价:38.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

爆破法以其施工机具结构简单、轻便灵活、操作容易、维修方便、耗能少、效率高,而广泛应用于国民经济建设的许多领域。随着科学技术的迅猛发展,近年来出现了许多凿岩爆破的新理论、新技术和新方法。

笔者在参阅大量国内外研究资料的基础上,结合多年的爆破实际工作的经验,编写了本书。本书从实用角度出发,在系统阐述爆破理论的基础上,重点介绍了目前工程中最常用的和具有发展前景的爆破技术,主要内容包括:炸药爆炸的基本理论、工业炸药、岩石的爆破作用机理、起爆器材和起爆方法、药壶爆破、炮眼爆破、预裂爆破和光面爆破、硐室爆破、钻孔拆除控制爆破、水压控制爆破、水下爆破、爆炸成型、爆破安全技术和爆破测试技术等内容。与其他同类书籍相比,本书既包括爆破的理论,又含有爆破的实用技术。因此,理论与实践并重和实用性强是本书的主要特点。

本书的绪论由河南省地质矿产勘查开发局第四地质探矿队的肖汉甫高级工程师和中国地质大学(武汉)的吴立教授编写;第一、二、三、四章由吴立编写;第五、六、七章由肖汉甫编写;第八、九、十章由葛洲坝集团公司的陈刚高级工程师(中国地质大学博士研究生)编写;第十一、十二、十四章由长江重庆航道工程局的李春军高级工程师(中国地质大学工程硕士研究生)编写;第十三、十五章由浙江省杭州中龙建设发展有限公司的袁兆龙高级工程师(中国地质大学博士研究生)编写。全书由肖汉甫、吴立统编。全书的所有图件由研究生谢其勇、左清军绘制;研究生周斌参加了部分文字的输入工作;研究生左清军、邹振参加了校对工作。

本书可作为爆破专业的本科生、研究生和工程技术人员的参考书。

限于笔者的水平,书中难免存在错误和不当之处,竭诚希望读者不吝赐教。

本书的出版得到岩土钻掘与防护教育部工程研究中心和教育部科学技术研究重点项目(No. 08Y303)的资助。

作 者

2009 年 5 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 炸药爆炸的基本理论	(5)
第一节 爆炸及炸药的一般特征	(5)
第二节 炸药的起爆与感度	(10)
第三节 炸药的爆轰原理	(17)
第四节 炸药的氧平衡与热化学参数	(27)
第五节 炸药的爆炸性能	(33)
第六节 炸药的聚能效应	(36)
第二章 工业炸药	(40)
第一节 概 述	(40)
第二节 单质炸药	(40)
第三节 粉状硝酸类炸药	(43)
第四节 含水硝酸类炸药	(45)
第五节 其他工业炸药	(49)
第六节 燃烧剂与静态破碎剂	(50)
第三章 起爆器材和起爆方法	(53)
第一节 概 述	(53)
第二节 工业雷管	(53)
第三节 索状起爆材料	(60)
第四节 非电起爆法	(64)
第五节 电力起爆法	(70)
第六节 发展中的新型起爆方法	(77)
第四章 岩体爆破作用机理	(79)
第一节 概 述	(79)
第二节 岩体内的爆炸冲击波和应力波	(79)
第三节 岩体的爆破破碎机理	(85)
第四节 单个药包的爆破作用	(86)
第五节 成组药包的爆破作用	(94)

第六节 装药量计算原理	(96)
第七节 影响爆破作用的因素	(99)
第五章 药壶爆破	(107)
第一节 设计计算	(107)
第二节 施工工艺	(109)
第六章 炮眼爆破	(112)
第一节 概 述	(112)
第二节 隧道掘进中的炮眼爆破	(112)
第三节 小台阶爆破	(121)
第七章 露天深孔爆破	(125)
第一节 露天深孔的布置及爆破参数的确定	(125)
第二节 深孔微差爆破	(130)
第三节 深孔挤压爆破	(131)
第四节 装药结构与爆破网路数设	(132)
第八章 预裂爆破和光面爆破	(134)
第一节 预裂(光面)爆破的作用机理	(134)
第二节 预裂爆破	(136)
第三节 光面爆破	(141)
第九章 硐室爆破	(146)
第一节 概 述	(146)
第二节 爆破抛掷作用原理	(146)
第三节 布药设计	(151)
第四节 施工设计	(158)
第五节 爆堆尺寸估算	(161)
第六节 地形地质条件对爆破作用的影响	(164)
第十章 钻眼拆除爆破	(170)
第一节 概 述	(170)
第二节 钻爆参数和装药量计算	(174)
第三节 工程实例	(178)
第十一章 水压爆破	(186)
第一节 概 述	(186)
第二节 水压爆破的特点和原理	(186)
第三节 水压爆破参数的计算	(187)
第四节 水压爆破在城市构筑物拆除中的应用	(191)

第五节	水压爆破在岩土和矿山工程中的应用·····	(193)
第十二章	水下爆破·····	(197)
第一节	概 述·····	(197)
第二节	水下爆破设备·····	(198)
第三节	水下爆破施工方法·····	(199)
第四节	水下爆破有害效应的控制·····	(205)
第五节	水下爆破的清碰和验收·····	(207)
第十三章	爆炸成形加工·····	(209)
第一节	工程合金的可成形性·····	(209)
第二节	爆炸成形的力学性能·····	(210)
第三节	大气和水下爆炸成形系统·····	(210)
第四节	模压成形和非模压成形·····	(211)
第五节	自由成形最终形状的分析·····	(213)
第六节	模子设计的参数和分析·····	(214)
第七节	拱形件和球形压力容器元件的成形·····	(215)
第八节	其他成形工作·····	(218)
第十四章	爆破安全技术·····	(220)
第一节	概 述·····	(220)
第二节	外来电流的预防·····	(222)
第三节	爆破地震效应的预防·····	(226)
第四节	爆炸空气冲击波的预防·····	(228)
第五节	飞石和有毒气体的预防·····	(229)
第十五章	爆破测试技术·····	(232)
第一节	爆破地震效应的观测·····	(232)
第二节	爆炸空气冲击波的测试·····	(237)
第三节	外来电的测试·····	(237)
第四节	爆破作用过程的高速摄影观测·····	(240)
参考文献	·····	(242)

绪 论

一、爆破技术在国民经济建设中的作用和意义

爆破法以其施工机具结构简单、轻便灵活、操作容易、维修方便、耗能少、效率高,而广泛应用于国民经济建设的许多领域,例如矿山部门的露天开采和地下巷道的掘进及矿石开采;水利部门的定向爆破筑坝;交通部门的路堑爆破、填筑路堤和软土、冻土地带的爆破、水下炸礁、疏通航道和水下码头压实软土,以及堤坝地基处理的水下爆破;石油化工部门埋设地下管道和过江管道,以及处理油井卡钻事故的爆破等,都是经常使用的爆破方法。我国的“六五”期间,许多厂矿企业进行了改建、扩建和拆迁,许多城市也进行了改建和扩建,拆除控制爆破技术的应用得到了空前的发展,不仅成功地把过去危险性大的爆破作业由野外安全可靠地引入到了人口密集的城镇,更重要的是创造了许多新技术、新工艺和新经验。近年来,由于凿岩机具和爆破器材的发展,爆破技术得到了迅速的提高,出现了许多凿岩新方法和爆破新技术,应用范围也不断扩大,例如利用炸药爆炸原理在机械工业部门加工处理机械零部件的爆炸加工方法和医学上的爆炸破碎膀胱结石的方法。

新中国成立后,爆破技术在我国矿山采掘、铁路(公路)修筑、农田水利建设等国民经济基础建设的恢复和发展中立下了汗马功劳;改革开放以来,我国爆破科技事业获得了蓬勃发展。特别是近十年来,与工程建设项目紧密结合,爆破技术在三峡工程、青藏公路、西气东输工程、城市建设及其他基础建设项目中发挥着重要作用。同时,我国在起爆器材、乳化炸药、硇室爆破、城市拆除控制爆破等分支领域的科技成果和发展水平已跻身于国际先进行列;向国外出口技术和产品,在国外建设工厂、承接工程,直接参与国际市场竞争,受到国际同行的广泛关注。

总之,爆破技术广泛应用于国民经济建设的许多领域,为社会主义经济建设做出了巨大的贡献。

二、爆破技术的发展历史

人类利用爆破的方法进行生产实践活动的历史久远。

在爆破器材方面,早在公元7世纪至9世纪,我国就发明了黑火药,人类从此知道了“爆炸”。南宋时期,黑火药被首次应用于战争;13世纪黑火药传入欧洲;17世纪匈牙利人首先将黑火药用于采矿业,从此出现了“爆破”。此后西欧人发明了硝化甘油、TNT、黑索金等多种后来叫做猛炸药的物质,由于没有可靠的起爆手段,军事上和工业上都难以有效利用。直到1867年,瑞典人诺贝尔同时发明了雷管和工业硝化甘油炸药,从此揭开了现代工业炸药的序幕,带动了爆破技术的飞速发展。20世纪中叶,爆破规模的不断扩大和爆炸工艺的多样化,刺激了爆破器材的快速发展;爆破器材的快速发展又推动了爆破和爆炸工艺的巨大进步。我国在20世纪60年代生产出了浆状炸药,以后又陆续生产了露天岩石炸药、煤矿安全炸药、高威

力铵梯炸药和抗水岩石炸药及段发雷管。20 世纪 60 年代末,由于 TNT 供应紧张,开始开发无梯露天炸药,如铵油炸药、铵沥蜡炸药、铵松蜡炸药和铵黑炸药及毫秒雷管等。20 世纪 70 年代,我国开始引进研制乳化炸药和水胶炸药等含水炸药,因不含 TNT,爆破炮烟浓度低,生产使用安全,抗水性能好而迅速发展。因此,有的学者总结出了 20 世纪爆破器材的五大发明:电和非电毫秒延时起爆系统、硝铵基炸药及其含水衍生品种系列炸药、不耦合装药、塑性薄膜炸药、无起爆药雷管。固体火焰理论促进了微气体产物的毫秒延时药剂的诞生;管道效应导致了非电导爆管和不耦合装药的发明;表面化学和表面物理学进展演化出了抗水硝铵类炸药;爆燃转为爆轰的研究成果促进了无起爆药雷管的构思。电和非电延时起爆系统的先后发明,成为大规模群药包依序爆破的开端,同时又成为减轻爆破地震、冲击波等有害效应的有力工具;抗水起爆器材和抗水炸药是软基处理和各种水下爆破工程的可靠手段;比硝化甘油安全、便宜得多的硝铵基炸药及其含水衍生品种的发明为实施上述爆破奠定了坚实的基础;塑性、薄层或聚能装药是爆炸成型、复合、穿孔、切割、表面硬化和消除残余应力的动力。无起爆药雷管的问世则根本改善了雷管造、存、运、用的安全性,并为根治起爆药的生产污水提供了保证。目前,我国共有爆破器材生产厂家 400 多家。

在爆破理论研究方面,1907 年出现了以静力学为基础的乌斯宾斯基理论;20 世纪 50 年代开始,弹性力学、光弹实验等理论和实验方法应用于凿岩爆破理论;20 世纪 60 年代,应力波理论逐渐成为分析爆破问题的主流理论。

20 世纪中叶,风动、液压凿岩机和硬质合金钻头的发展,极大地提高了凿岩效率,与爆破器材的进步相配合,使万吨级硐室群药包一次爆破 $1\,300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 岩石成为可行的工艺方法(中国),而配备了大容积铲斗的电力或液压挖装机械和大型运载车型的出现,则使 $1\,500 \sim 3\,000 \text{ t}$ 炸药深孔群药包一次爆破 $70 \times 10^4 \sim 150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 矿岩成为日常生产环节(美国)。新型机械、新型爆破器材与爆破技术的配合,极大地提高了生产效率,为人类社会创造了巨大的财富。

然而由于爆破的研究和实践存在条件和对象的多样化、复杂化,目前爆破的理论研究深度还不够深入,对一些问题尚无统一的认识,理论与实际应用尚有较大的差距。因此,加强理论与工程实际相结合仍是国内爆破界的当务之急,以理论指导实践,克服经验主义,首先要加强爆破基础理论的研究,探索和解决与实践有关的爆破作用机理问题。此外,就全国普遍情况来讲,从事爆破工程实践的人员众多,长期以来除因炸药雷管的生产供应由有关部门统一管理外,在爆破工艺的好坏与爆破器材的应用、新理论、新器材、新技术的研究推广等方面还缺乏统一的强有力的组织领导和管理的。

三、爆破技术的发展方向和前景

作为一种破岩的基本方法,爆破法仍然是目前乃至将来相当长一段时间内的一种不可替代的岩石破碎方法,特别是坚硬岩石的破碎主要还是依赖于爆破方法。从爆破能量的利用上来看,提高爆破安全和提高爆破效率实质上是一个问题的两个方面,爆破的有效性和爆破的危害性都是爆炸威力造成的,如何改善爆破器材的性能以及爆破技术工艺、提高爆破效率和爆破安全是目前爆破工作者最根本的任务。

可以预计,爆破领域将在以下几个方面产生飞跃并具有广阔的发展前景。

1. 发展内部药包和大抵抗线药包爆破技术

内部药包已在扩大油井产油生产率、提高早井出水率等方面做出了贡献。预期在 21 世纪中叶,由于煤层气化、油页岩原地析馏以及陆地、深海浸析采矿的需求,以内部药包爆炸获取范围广阔、裂缝细匀的爆破技术将会得到发展。这种爆破的装药应有高能量密度,以减小钻孔直径和孔网密度;有适当的爆炸初压,既促使裂缝产生又无大范围过度粉碎;有较长的爆压持续时间,以支持裂缝扩展。因此,可能的方案之一是不耦合或水耦合的、间隔装填的或相继起爆的药包群。美国 Los Alamos 国家试验室的 Shale 模型是解决原地爆炸油页岩的有益尝试,说明内部药包具有发展前景。另一方面,大抵抗线药包爆破用于山脉、冰川、沙漠或河道改造以及海底非浸析采矿可能会逐渐普及。

2. 爆破器材将具有划时代的进展

首先,工业炸药可能向以下三个方面发展。

(1)可能出现比硝酸炸药更经济有效的缔合键能炸药。以空气和煤为原料的硝酸铵价格低廉,爆炸力中等,成为 20 世纪工业炸药的基础成分。然而,绝大多数现有工业炸药都是氧化还原型炸药,爆炸产生有害气体。据估计,工业爆炸每年排入大气的一氧化碳约为 $70 \times 10^4 \sim 80 \times 10^4 \text{t}$,氮氧化物约为 $20 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{t}$,成为环保问题之一。地球能接受的爆炸产物是 N_2 、 O_2 和 H_2O 。因此,发展以空气为原料、爆炸后再生成空气成分的炸药将是需要探索的方向之一。相同原子的缔合键比不同原子的化合键的能量大,以缔合键能炸药取代化合键能炸药也应是发展方向之一,试制 N_3 或 O_3 及其缔合物值得实践。 N_3 已经在美国试验室爆炸成功,预示着以空气为原料的振荡共价键能炸药的诞生,其爆炸产物为 N_2 ,故同时也是环保炸药。

(2)核爆炸能的和平利用。核爆炸现实的困难是保安、价格和产物的放射性污染。保安在于加强管理。降低价格在于民用化,面向市场的规模生产是降低成本的关键。放射污染有待发展清洁的核爆炸。在没有清洁核爆炸之前,核炸药可以用作内部药包,即利用核爆炸的高温使药包附近的岩石熔化形成玻璃体壳,将放射产物“关闭”在壳中。俄罗斯成功地地下销毁了核武器,表明了这个方案的可行性。在实现清洁的核爆炸之后,核炸药在大抵抗线药包爆破中将举足轻重,并为大地改造和深海爆破做出极大的贡献。

(3)更小夸克的爆炸能源的利用。李政道在 1999 年预言:尽管宇称守恒定律已被证明,但现实中宇称都不守恒,表明空间中存在着无限的能源。并且说,正像 20 世纪初普朗克常数和测不准关系引导出核能、激光一样,新的发现将会出现。这是否预示着爆破业在将来可能利用更小夸克的爆炸能,尽管利用的方式目前还不清楚。

其次,起爆器材也将有更进一步的发展。

(1)信息延时起爆技术。信息技术将促进更精确且延时段别可任意控制的起爆系统的问世,使爆破效果和爆破有害效应得到更精确的控制。

(2)无起爆药雷管将会普及,无雷管起爆也可能实现。虽然 20 世纪未能实现工业炸药的无雷管起爆,但将来可能会有一种价格可与雷管竞争的非雷管高新技术起爆器材问世。

(3)高抗水和耐热起爆器材。随着地层深部采矿和海底采矿的发展,耐地热和耐深水起爆器材将会发展。双层管真壳的水压自补偿式雷管和非雷管起爆应当有广阔的应用前景。

3. 可能形成兴旺的爆炸产业

钱学森在 1981 年就指出:“爆炸可以产生极强的脉冲电流、脉冲磁场和极高的压力。这里有能量转化问题,而对研究来说,特别要求转化过程的精密控制。爆炸所产生的高压已用于生

产,如爆炸成型和爆炸金刚石等。”近年来,利用爆炸产生的极强脉冲电磁场作为军用电子对抗手段已装备部队,用爆炸效应育种、纤维酯化等也有报导。

(1)巩固和发展爆炸加工业。爆炸成型、复合、异型件冲孔等已经形成一定规模的产业,而爆炸切割、硬化和消除残余应力多在废旧结构拆除、大型设备维修中发挥作用。从一定意义上说,爆炸加工是机械制造业的组成部分。

(2)发展爆破伴生品产业。20世纪用于爆破的数十亿吨炸药,只有爆破效果,没有伴生产品,极大地降低了爆破效益。不过,从理想到现实,需要解决的关键问题,首先是如何实现能量转化的精密控制。例如,利用电磁场的产品,要避免高压或负压的损伤;利用高压或负压的产品,要排除电磁场的干扰,等等。有的学者把爆破伴生产业称为“黑匣子”产业,含义就在于此。因此,设计各种“黑匣子”是未来产业成败的核心。其次,要使炮孔和药室装药满足生产伴生产品所需的参数。以爆炸金刚石为例,硝铵类炸药的爆速和爆压峰值可能偏低,或需以高能炸药包围“黑匣子”,或需设计聚能装药结构向“黑匣子”聚集能量。同理,生产其他产品所需的参数也要采取附加措施加以满足,才能获得所需产品。人们早有预测,仅实现金刚石生产这一项,就比工程爆破本身的效益更好,还可以设想生产贮存脉冲电磁能器件、高压记忆和回放器件,等等。

(3)利用爆炸扩展食物链产业。利用爆炸脉冲高压、负压或电磁场进行育种、纤维酯化或膨化等已有报导。这里指的是精细产业,可能需要造成瞬态环境参数跨度很大的条件,需要从气体爆炸直至核爆的瞬态脉冲参数,相信爆炸科学会予以满足,同时爆炸科学本身也将得到极大的促进。当然其他的物理、化学工艺在扩展食物链方面将是爆炸方法的有力竞争伙伴。

4. 完善爆破技术的多方控制

实现多方控制是爆破工作者们多年来共同努力的方向,工程爆破中的城市拆除爆破、抛掷爆破、松动爆破等都已成功地实现了安全和效果的双面控制,主要表现在爆破时间、爆破能量、爆破顺序、爆破环境等方面对爆破机理、爆破质量、爆破方向、爆破产物、爆破危害、爆破效果等实行控制。只要能够对各种爆破作业实行准确控制,爆破法的生命力就是无尽的。

第一章 炸药爆炸的基本理论

第一节 爆炸及炸药的一般特征

一、爆炸及炸药的定义

爆炸是物质系统一种极迅速的物理或化学变化过程。在变化过程中,系统的内能转变为机械能及其他形式的能,从而对周围介质做功。爆炸的重要特征是,大量能量在有限的体积内迅速释放并急剧转化,从而使周围介质急剧受压,显示出机械破坏效应,并伴随有声响和发光效应。

按引起爆炸原因的不同,可将爆炸分为物理爆炸、核爆炸和化学爆炸三大类。

1. 物理爆炸

物理爆炸即由物理原因造成的爆炸。爆炸前后,物质的化学成分不变,只是物理状态发生了改变。例如,锅炉爆炸、氧气瓶爆炸、轮胎放炮等都是物理爆炸。

2. 核爆炸

核爆炸是由核裂变或核聚变引起的爆炸。核爆炸放出的能量极大,相当于数万吨至数千吨 TNT,爆炸中心区温度可达数百万至千万摄氏度,压力可达数百万大气压,并辐射出很强的各种射线。

3. 化学爆炸

化学爆炸是由化学变化造成的爆炸。爆炸前后,不仅物质的物理状态发生了改变,物质的化学成分也发生了改变。例如,炸药爆炸、井下瓦斯或煤尘与空气混合物的爆炸等都是化学爆炸。

炸药是指在一定条件下能够发生快速化学反应、放出能量、生成气体产物,并显示出爆炸效应的化合物或混合物。就化学组成而言,除少数起爆药外,炸药都是由两部分物质组成的,即氧化剂和还原剂(燃料)。

对于化合物炸药,氧化剂是炸药分子中含氧的基团,还原剂(燃料)则是炸药分子中含碳、氢的基团。这两种基团都是反应性很强的活性原子基团,但在炸药分子中被活性小的中性原子基团或原子(通常为氮原子)所隔开,如图 1-1 所示。当炸药分子被外界能量活化时,分子运动速度加快,分子之间的碰撞力增大。当碰撞力增至一定程度后,炸药分子破裂,释放出活性基团,相互发生化学反应,形成气体产物,并以热能形式放出其内含的化学能。由于爆炸过程极为迅速,爆炸结束时,气体产物不可能发生明显膨胀,故气体产物的温度和压力都很高。其后,气体产物膨胀,将能量传给周围介质。

对于混合物炸药,氧化剂是含氧的不具有爆炸性的氧化剂分子或富有氧元素的炸药分子,

还原剂(燃料)则是非爆炸性的可燃剂分子或富有碳、氢元素的炸药分子,如图 1-2 所示。使这类炸药爆炸,同样也需要从外界给予足够的活化能,来增加炸药内各种分子的运动速度和相互间的碰撞力,使之产生迅速的化学反应。

由此可见,炸药是既安定又不安定的物质。在平常条件下,炸药是比较安定的物质,因此除起爆药外,炸药的活化能是相当大的(一般为 $138 \sim 230 \text{ kJ/mol}$)。但当局部的炸药分子被活化到足够数目时,就会丧失安定性,引起炸药爆炸。因此,对待炸药既不要畏惧,但又要慎重。

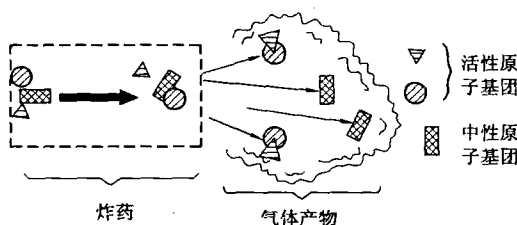


图 1-1 化合物炸药爆炸时能量释放示意图

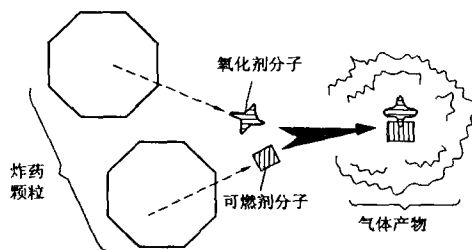


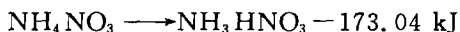
图 1-2 混合炸药爆炸时能量释放示意图

二、炸药化学变化的基本形式

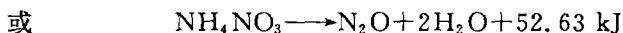
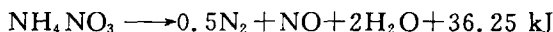
爆炸并不是炸药惟一的化学变化形式,由于环境和引起化学变化的条件不同,炸药有四种不同形式的化学变化:热分解、燃烧、爆炸和爆轰。

1. 热分解

和其他物质一样,炸药在常温下也会缓慢分解,温度越高,分解越显著。炸药热分解时,炸药内部各点的温度相同,分解反应在整个炸药内部同时进行,没有集中的反应区,分解反应既可吸收热量,也可放出热量,取决于炸药类型和环境温度。但当温度较高时,所有炸药的分解反应都伴随有热量的放出。例如,硝酸铵在常温或温度低于 150°C 时,其分解反应为吸热反应,反应方程为



当加热到 200°C 时,分解反应将放出热量,反应方程为:



分解反应为放热反应时,如果放出的热量不能及时散失,炸药温度就会不断升高,促使反应速度不断加快和放出更多的热量,最终就会引起炸药的燃烧和爆炸。

2. 燃烧

同其他可燃性物质一样,炸药在热源(例如火焰)的作用下,也会燃烧,区别仅在于炸药的燃烧不需要外界供氧。炸药的快速燃烧(每秒数百米)又称爆燃。

就化学变化的实质来说,燃烧是可燃元素(碳、氢等)激烈的氧化过程。但燃烧与热分解或一般的氧化反应不同,燃烧不是在全部分物质内同时展开的,而只是在局部区域进行并在物质内传播。进行燃烧的区域称为燃烧区,因燃烧反应是在该区域内完成的,所以又称反应区。

炸药在燃烧过程中,若燃烧速度保持定值,不发生波动,则称为稳定燃烧,否则称为不稳定燃烧。炸药是否能够稳定燃烧,取决于燃烧过程进行时的热平衡。如果热量能够平衡,即反应区放出的热量与传递给炸药邻层和周围介质的热量相等,燃烧就能稳定,否则就不能稳定。不稳定燃烧可导致燃烧的熄灭、震荡或转变为爆炸。

炸药燃烧主要靠热传导来传递热量。因此,稳定燃烧的速度不可能太高,一般为每秒几毫米到每秒几米,最高也只能达到每秒几百米,低于炸药内的声速。炸药的燃烧速度受环境条件的影响较大。

3. 爆炸

炸药的爆炸过程与燃烧过程类似,化学反应也只在局部区域(反应区)内进行并在炸药内传播。爆炸反应区的传播速度称为爆炸速度。大多数炸药的爆炸是氧化反应。燃烧与爆炸的主要区别在于:燃烧靠热传导来传递能量和激起化学反应,受环境条件的影响较大,而爆炸则靠压缩冲击波的作用来传递能量和激起化学反应,基本不受环境条件的影响;爆炸反应比燃烧反应更为激烈,放出的热量和产生的温度也更高;燃烧产物的运动方向与反应区的传播方向相反,而爆炸产物的运动方向与反应区的传播方向相同,故燃烧产生的压力较低,而爆炸则可产生很高的压力;燃烧速度是亚音速的,而爆炸速度则是超音速的。爆炸的反应速度通常为每秒几百米到每秒几千米,但是这种速度与外界的条件关系不大,一般地,炸药的爆炸过程很不稳定,不是过渡到更大爆速的爆轰阶段,就是衰减到很小爆速的爆燃阶段,甚至熄灭。

4. 爆轰

炸药以最大的稳定速度进行传播的过程称为炸药的爆轰。爆轰是炸药特有的一种化学变化形式,与外界的压力、温度等条件无关。炸药的爆轰速度一般为每秒数千米到每秒数万米。例如,TNT的爆轰速度为6 800m/s。对于任何一种炸药来说,在给定条件下,爆轰速度是一个常数。在爆轰状态下,爆炸具有最大的破坏作用。

爆炸和爆轰并无本质的区别,只不过传播速度不同而已。爆轰的传播速度是恒定的,爆炸的传播速度是可变的,从这个意义上讲,爆炸就是爆轰的一种形式,即爆炸是一种不稳定的爆轰状态。

应当指出,炸药化学变化的上述四种基本形式在性质上虽有不同之处,但它们之间却存在着非常密切的联系,在一定条件下可以相互转化。炸药的热分解在一定的条件下可转变为燃烧,而炸药的燃烧随温度和压力的增加又可能发展而转变为爆炸,直至过渡到稳定的爆轰状态。

三、炸药爆炸的基本特征

放出能量、生成气体产物、反应和传播高速度是炸药爆炸的三个基本特征,也是构成炸药爆炸的充分必要条件,缺一不可,故称为炸药爆炸的三要素。

1. 放出能量

炸药爆炸就是将其内部蕴藏的大量化学能(潜能)以热能的形式迅速释放出来的过程。由表1-1可以看出,1kg炸药的放热量与1kg燃料的放热量相比较,燃料的放热量优于炸药的放热量,但若按每升放热量计算,炸药则占绝对优势(计算每升放热量时,以燃料和空气的混合物为计算基准)。因此,炸药在能量方面的特点是,微小容积中蕴藏着大量的能量,即炸药的能量密度 $\rho_c Q_v$ 很高(ρ_c 为炸药密度, Q_v 为爆热,即单位质量炸药放出的热量)。

表 1-1 炸药和普通燃料的放热量

物质名称	1kg 放热量(kJ)	1kg 燃料-空气混合物放热量(kJ)	1L 放热量(kJ)
汽油	42 000	9 240	17.64
无烟煤	33 600	9 240	18.06
木材	18 900	7 980	19.74
硝化甘油	6 300	—	10 080
TNT	4 200	—	4 830
黑火药	2 940	—	2 814

由表 1-2 中各种草酸盐的反应热效应与其爆炸性能的比较可以看出,放出大量的热能是形成化学爆炸的必要条件,吸热反应或放热不足都不能形成爆炸,即使同一种化合物,由于激起化学反应的条件和热效应不同,也有类似的结果。例如硝酸铵,150℃时的分解反应为吸热反应,当加热到近 200℃时,分解反应虽为放热反应,但放热量不大,仍不能构成爆炸,当迅速加热到 400~500℃或利用传爆药柱强力起爆时,由于放热量增大,就会引起爆炸,其爆炸反应为

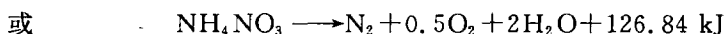
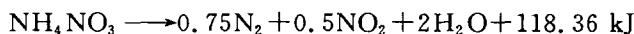
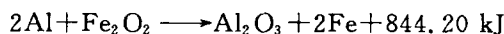


表 1-2 草酸盐的爆炸性能

名称	反应式	热效应(kJ)	爆炸性
草酸锌	$\text{ZnC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Zn}$	-206.22	不爆
草酸铅	$\text{PbC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Pb}$	-70.14	不爆
草酸铜	$\text{CuC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Cu}$	+28.14	不爆
草酸汞	$\text{HgC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Hg}$	+72.66	爆
草酸银	$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{Ag}$	+123.90	爆

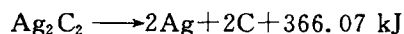
2. 生成气体产物

炸药爆炸放出的能量必须借助气体介质才能转化为机械能。因此,生成气体产物是炸药做功不可缺少的条件。炸药爆炸放出的热量先转变为气体的压缩能,随后在气体膨胀过程中转变为机械能。如果物质的反应热很大,但没有气体产物生成,就不会具有爆炸性。例如铝热剂的化学反应



按每千克放热量计算,铝热剂的放热量比 TNT 高,并能形成 3 000℃的高温,使生成产物熔化,但却不会发生爆炸。

有些物质反应后的生成产物虽然是固体,但却很容易引起爆炸。例如乙炔银的分解反应



这是因为在反应温度条件下,银发生了气化以及周围空气被迅速加热并膨胀的缘故。

虽然炸药爆炸放出的热量不可能完全转化为机械能,但生成气体数量越多,热量利用率也越高。

3. 反应和传播高速度(反应过程高速进行)

爆炸化学反应是由压缩冲击波引起的,因此,反应速度和爆炸速度都很高。在反应区内,炸药变成爆炸产物的时间只需几十微秒,甚至不到一微秒,爆炸速度可达每秒数千米。爆炸过程的这种高速度,决定了炸药在很短时间内能放出大量热量,从而具有极大的威力(炸药在单位时间内的做功能力)。

四、炸药的分类

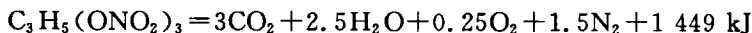
(一)按炸药的组分分类

炸药按组分分类的方法很多。这里仅介绍一种比较简单的方法,即将炸药分为单体(质)炸药和混合炸药两大类。

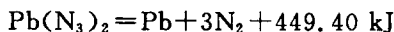
1. 单体(质)炸药

单体(质)炸药又称爆炸化合物。它本身是一种化合物,即一种均一的相对稳定的化学系统。单体炸药在外界作用下,能导致分子内键的断裂,发生迅速的爆炸变化,生成热力学性质稳定的化合物。

这类炸药多数是含氧的有机化合物,能进行分子内燃烧。例如,硝化甘油的爆炸分解反应式为



还有一部分是不含氧的化合物,它们在外界的作用下迅速分解为其组成的元素,并放出其生成热。例如叠氮化铅,其爆炸反应式为



单体(质)炸药的不稳定性与分子内具有特殊爆炸性能的基团有关。如存在于乙炔衍生物中的乙炔银(Ag_2C_2)和乙炔铜(CuC_2),存在于氮的卤化物中的氯化氮(NCl_2)和二碘化氢氮(NHI_2),存在于叠氮化合物和偶氮化合物中的叠氮化铅 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$,存在于雷酸盐中的雷汞 $[\text{Hg}(\text{ONC})_2]$ 和雷银(AgONC)等,都是具有这种特殊爆炸性能的基团。

2. 混合炸药

混合炸药是由两种或两种以上化学性质不同的组分组成的混合物。这种混合物既可以含单质炸药,也可以不含单质炸药。但混合物内应含有氧化剂和可燃剂两部分,而且二者是以一定比例均匀地混合在一起的,当受到外界能量激发时,能发生爆炸反应。混合炸药是目前工程爆破中应用最广、品种最多的一类炸药。

(二)按炸药的用途分类

1. 起爆药

起爆药是一种对外界作用十分敏感的炸药,它不仅在比较小的外界能量的作用下就能发生爆炸反应,而且反应速度可以在很短的时间内增至最大值。起爆药主要用于装填雷管和其他火工品,利用它来起爆猛炸药。

最常用的起爆药有雷汞、叠氮化铅和二硝基重氮酚等。

2. 猛炸药

猛炸药具有相当大的稳定性,对外界作用的敏感度比起爆药低得多,在使用时需用起爆药

起爆。猛炸药的爆炸威力大,能对周围介质产生强烈的破坏作用。常用的工业炸药,如 TNT、乳化炸药、浆状炸药、铵梯炸药和铵油炸药等都是猛炸药。

3. 发射药

发射药又称火药,其主要特点是对火焰敏感,化学反应呈燃烧形式,但在密闭条件下可转变为爆炸。发射药在军事上主要用来发射枪弹和炮弹以及作为推进火箭的燃料。在工业上主要用黑火药制作导火索药芯,也有用作延期药的。

(三)按炸药的使用条件分类

煤炭部门生产的炸药,按其使用条件分为三类:煤矿许用炸药、岩石炸药和露天炸药。

1. 煤矿许用炸药

这类炸药对炸药爆炸后的有毒气体生成量、威力、爆温、火焰长度及其持续时间均有严格的规定,主要用于有沼气和煤尘爆炸危险的矿井和工作面的爆破作业。

2. 岩石炸药

这类炸药只对有毒气体生成量有限制,主要用于没有沼气和煤尘爆炸危险的矿井和工作面的爆破作业。

3. 露天炸药

这类炸药对炸药爆炸后的有毒气体生成量、威力、爆温、火焰长度及其持续时间均没有任何限制,但只能用于露天爆破。

此外,按炸药的物理形态分类还可将炸药分为固体(态)炸药(如常用的工业炸药)、液体(态)炸药(如硝化甘油、硝基甲烷、硝基苯等)、塑体或胶体炸药(形态介于固体和液体之间)和气体(态)炸药(各种爆炸性混合气体),前三种通常称为凝聚体(态)炸药。

第二节 炸药的起爆与感度

一、起爆与感度的概念

炸药是一种相对稳定的物质,是稳定性和爆炸性的矛盾统一体。在没有外界作用时不产生爆炸反应,只有受到外界足够能量的作用时才能激起爆炸。炸药在外界能量作用下激起爆炸的过程称为起爆。起爆炸药所需的外界能量称为起爆能或初始冲能。

(一)起爆能

工业炸药常用的起爆能有三种:热能、机械能和爆炸能。

1. 热能

利用加热作用,如火焰、火星、电热等形式使炸药起爆。工业雷管多利用这种形式的起爆能进行起爆。

2. 机械能

通过冲击、摩擦或针刺等机械作用,使炸药分子间产生强烈的相对运动,并在瞬间产生热效应使炸药起爆。武器多利用这种形式的起爆能。

3. 爆炸能

利用起爆药爆炸产生的爆轰波或高温、高压气体产物流的动能起爆另一些炸药。这是工程爆破中采用最广泛的起爆能。常用的有雷管、导爆索和中继起爆药包等爆炸能。