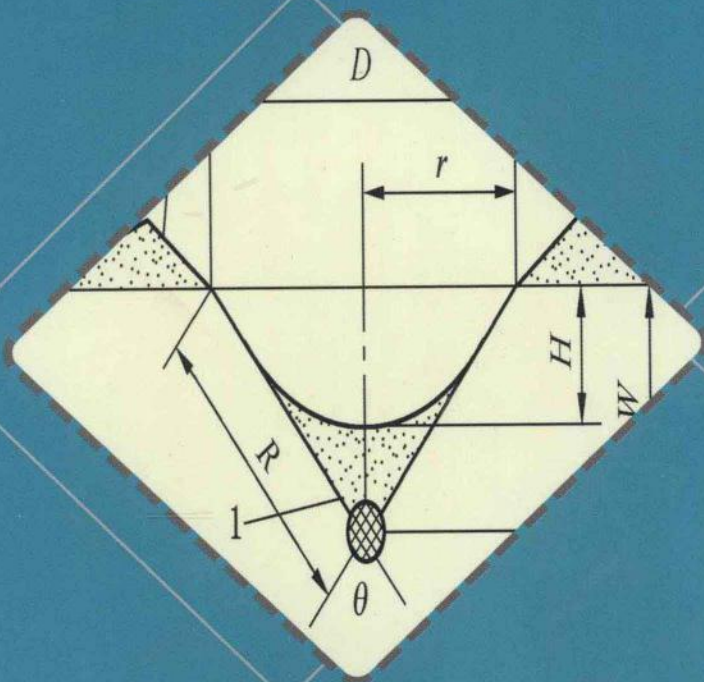


高等院校规划教材

爆破工程及其安全技术

主 编 高文蛟 陈学习



煤炭工业出版社

高等院校规划教材

爆破工程及其安全技术

主 编 高文蛟 陈学习

副主编 朱建芳 田 多 刘玉德

主 审 单仁亮

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

爆破工程及其安全技术/高文蛟, 陈学习主编. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2011

高等院校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3821 - 2

I. ①爆… II. ①高…②陈… III. ①爆破技术 - 高等学
校 - 教材②爆破安全 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 043945 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 13¹/₂
字数 315 千字 印数 1—2 000
2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷
社内编号 6631 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

前 言

近年来,随着我国改革开放的不断深入和经济建设的快速发展,爆破在国民经济建设中越来越显示出巨大的作用,已成为快速、经济、有效的工程作业的重要手段。它不仅涉及矿山、建筑、公路、铁路、水利等传统岩土工程领域,同时在新材料的爆炸合成、爆炸切割、爆炸焊接、爆炸成型和爆炸硬化等领域也有广泛的应用。为了推广应用新型爆破器材和先进的爆破技术,提高爆破效率和质量,贯彻落实新的《爆破安全规程》和《民用爆破器材安全管理条例》,加强爆破安全管理,预防爆破事故、减少爆破事故的发生,作者根据自己长期从事爆破的科研实践和教学的经验,参考了许多专家和工程技术人员发表和出版的资料和文献,编写了这本《爆破工程及其安全技术》教材。本教材基本涵盖了爆破工程的基础理论和技术,增加了爆破器材和爆破工程安全管理技术的内容,具有较强的知识性和实用性。

全书由高文蛟、陈学习任主编,朱建芳、田多、刘玉德任副主编。高文蛟对全书进行了统稿和修改。具体编写分工如下:高文蛟编写第1章、第2章、第3章;朱建芳编写第4章、第6章;陈学习编写第5章、第7章;田多编写第8章、第9章;刘玉德编写第10章、第11章。

中国矿业大学(北京)单仁亮教授对全书进行认真的审阅并提出的宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!同时,本书在撰写过程中参考了许多专家学者的文章著述,在此也对所有参考文献著作表示最真诚的感谢!

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免有不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2011年2月

目 次

1 绪论	1
1.1 爆破器材的发展史	1
1.2 爆破技术的发展及其在国民经济中的作用	3
2 炸药及爆炸的基本理论	6
2.1 爆炸现象及其特征	6
2.2 炸药及其相关概念	6
2.3 炸药的氧平衡及爆炸反应方程	9
2.4 炸药的起爆与感度	12
2.5 炸药的爆轰理论	17
2.6 炸药的热力学与性能参数	23
2.7 炸药的分类及其特性	31
3 起爆器材	38
3.1 雷管	38
3.2 传爆器材	47
3.3 起爆方法	52
4 爆破器材安全管理	61
4.1 爆破器材的购买与销售	61
4.2 爆破器材的装卸与运输	62
4.3 爆破器材的贮存	65
4.4 爆破器材的检验与销毁	73
5 岩石爆破破碎机理	77
5.1 岩石的基本性质	77
5.2 爆炸作用下岩石的破坏过程分析	80
5.3 爆破漏斗及利文斯顿爆破漏斗理论	84
5.4 装药量计算原理	89
5.5 影响爆破作用的主要因素	94

6 井巷爆破	99
6.1 平巷(平硐或隧道)掘进爆破	99
6.2 井筒掘进爆破	111
6.3 安全炸药理论与煤矿许用炸药	113
6.4 煤矿特殊条件下的爆破安全	119
7 露天爆破	129
7.1 孤石爆破	129
7.2 台阶爆破	129
7.3 硐室爆破	135
7.4 岩土爆破的控制技术	148
8 构筑物拆除控制爆破	158
8.1 概述	158
8.2 烟囱或水塔高耸建筑物的拆除	159
8.3 房屋类建筑物爆破拆除技术	164
8.4 基础拆除爆破	169
8.5 水压爆破技术	172
9 爆破危害的控制技术	176
9.1 爆破地震效应及减震措施	176
9.2 爆破空气冲击波及其防护	179
9.3 爆破飞石及其预防	181
9.4 爆破有害气体的产生与预防	183
10 爆破安全管理	185
10.1 爆破工程分级	185
10.2 涉爆企业、人员的要求与职责	186
10.3 爆破设计管理	190
10.4 爆破安全评估、审批、监督与环境要求	192
11 爆破施工安全与要求	194
11.1 爆破器材的准备与起爆系统要求	194
11.2 爆破施工操作	197
11.3 各类爆破安全要求	201
参考文献	207

1 绪 论

1.1 爆破器材的发展史

爆破器材是人类历史发展到一定阶段的产物。我们的祖先早在公元 7 世纪最先发明了以硫磺、硝石和木炭为原料配制的黑火药。黑火药发明后,公元 10 世纪,我国才开始将黑火药应用于军事。大约在公元 13 世纪,黑火药经印度、阿拉伯传入欧洲,直到 1627 年,匈牙利人将黑火药用于采掘工程,从而开拓了爆破工程的领域。黑火药作为世界上第一代工业炸药一直使用到 19 世纪中叶,延续达数百年之久。

现代炸药的合成始于 18 世纪,1771 年,英国 P. 沃尔夫 (Woulfe) 合成了苦味酸,用作黄色染料,直到 1885 年,法国才将苦味酸用于装填弹药;1863 年,德国 J. 维尔布兰德 (Wilbrand) 制得了梯恩梯,1902 年,德国首次用梯恩梯装弹;1891 年,德国化学家托伦斯等人用季戊四醇与浓硝酸硝化而制得太安。这是一种单体高能炸药,多用于制造导爆索、传爆药柱以及雷管中的次发装药,在第一次世界大战中太安得到了比较广泛的应用。1899 年, G. F. 亨宁在合成医药时制得黑索金;1922 年, G. C. 赫尔茨首先确认它是一种有价值的炸药,在第二次世界大战中受到各国的重视,并发展了以黑索金为基础的高性能混合炸药;1941 年, G. F. 赖特 (Wright) 和 W. E. 巴克曼 (Bachmann) 发现的奥克托金,在战后得到了实际应用,至此,从应用的单体炸药而言,炸药的发展经历了第一代苦味酸、第二代梯恩梯、第三代黑索金的 3 个里程碑的时代。

对于工业混合炸药来说是从硝化甘油炸药开始的。1847 年,意大利的 Sobrero 采用硫酸混酸低温硝化工艺首先制得硝化甘油,并认识它具有爆炸性能,到 1862 年由瑞典工程师 Nobel 建立了第一个生产硝化甘油的工厂,但由于硝化甘油的液体稠度较大及对冲击摩擦的感度较高,大大地限制了它的应用。Nobel 在一个偶然的把硝化甘油溅到包装用的硅藻土里,发现硅藻土能吸收大约 3 倍与自身质量的硝化甘油, Nobel 开始将 75% 硝化甘油和 25% 硅藻土的混合物作为爆炸剂投放市场,这就是 Nobel 发明的第一代代拿买特 (Dynamite)。以后 Nobel 公司对其进一步研究得出了一系列产品,如爆胶、代拿买克斯 (Dynamex) 等。由于代拿买特有易起爆、传爆稳定且爆炸威力高等特点,它迅速取代了黑火药,获得了广泛的应用。1867 年,瑞典的 Ohlsson 和 Norrbein 提出了硝酸铵和各种燃料油制成的混合炸药专利,从而奠定了硝酸铵类炸药与代拿买特炸药相互竞争发展的基础。硝酸铵类炸药经过几十年的发展,已逐步形成了适合各种爆破条件的炸药系列,如铵梯炸药、铵梯油炸药、铵油炸药、多孔粒状硝酸铵炸药、铵松蜡炸药、煤矿许用铵梯炸药等。浆状炸药是 1956 年由 Cook 及 Farnam 发明并开始使用的,它是以胶凝剂稠化的硝酸铵水溶液为连续相,燃料及敏化剂为分散相,通过交联剂形成网状结构的凝胶炸药。这种结构把水及敏化剂引入工业炸药体系中,不仅给工业炸药品种上增添了一个新的系列,而且打破了工业炸药不能含水的传统观念,巧妙地解决了工业炸药抗水的难题,为新型工业炸药的研制开创了广阔的天地,为以后的水胶炸药和乳化炸药的诞生奠定了基础。水胶炸药是

在浆状炸药的基础上改良获得的，由于浆状炸药的爆轰波冲击感度比较低，很难用 8 号雷管起爆，因此通过采用不同的敏化剂（甲胺硝酸盐）对浆状炸药进行改造，使得原浆状炸药的硝酸铵、硝酸钠混合体的析晶点明显降低，微细液珠的分散性增强，胶体的稳定性好，爆轰波感度显著提高，可直接用 8 号雷管起爆，爆轰性能也得到了大大的改善。1958 年，英国的迪西基特（Dithekite）研制成功了具有良好的爆轰性能的液体炸药。1969 年，美国的阿特拉斯（Atlas）化学工业有限公司的 Bluhm 发明了以油为连续相，过饱和氧化剂（硝酸盐）水溶液微滴为分散相的乳化炸药，它是含水炸药的进一步发展。到了 20 世纪 90 年代，我国又相继研制出了粉状乳化炸药和膨化硝酸铵炸药等新品种。

起爆器材的发展与应用始于 18 世纪，1778 年，L. G. 布朗哈里特发现雷汞，直到 1799 年才由英国高尔瓦德制造出了雷汞；1831 年美国比克福德（Bickfort）发明了导火索；1863 年，瑞典诺贝尔发明了火雷管。进入 20 世纪后，随着科学技术的进步和理论研究成果的应用，爆破器材和爆破技术也有了长足的发展。1919 年，出现了以太安为药芯的导爆索；1927 年，在瞬发电雷管的基础上研制成功了秒延期电雷管；1946 年，研制成功了毫秒电雷管；1967 年，瑞典诺比尔公司发明了塑料导爆管。电子雷管技术的研究开发工作大约始于 20 世纪 80 年代初，到 80 年代中期电子雷管产品开始进入起爆器材市场。

尽管黑火药诞生在我国，但我国的炸药工业发展较晚。新中国成立后，随着国民经济的迅速发展，建立了炸药厂，才真正有了自己的工业炸药。1953 年，我国开始生产以硝酸铵为主要成分，含梯恩梯、木粉等成分的粉状铵梯炸药，年产量为 2×10^4 t。1957 年，长沙矿山研究院等单位对粉状铵油炸药进行了比较深入的研究，1963 年铵油炸药得到了全面的推广和应用。1959 年，开始研制浆状炸药，20 世纪 60 年代中期在矿山爆破中获得应用，进入 70 年代浆状炸药发展十分迅速，浆状炸药装药车和可泵浆状炸药的出现，更好地满足了露天爆破作业的需要；70 年代后期，我国开始研制乳化炸药，90 年代还独创了粉状乳化炸药。目前乳化炸药已发展成品种齐全，能满足各种环境需求的主打品种。

在起爆器材方面，新中国成立初期还只能生产导火索、火雷管和瞬发电雷管，随着技术的进步和生产的需求，逐步能生产秒级延期和毫秒级延期电雷管。到 20 世纪 70 年代初期，阜新矿务局十二厂生产了导爆索——继爆管毫秒延期起爆系统；70 年代末，我国自行研制出了塑料导爆管及其配套的非电毫秒、半秒、秒延期起爆雷管，由于该种起爆器材的优越性，使其在露天矿山爆破、非煤地下矿山爆破、一般岩土爆破和城市拆除爆破等工程领域中得到了广泛的应用；80 年代中期，根据电磁感应原理我国研制生产了电磁雷管；90 年代还研制出了变色塑料导爆管。近年来，30 段等间隔（25 ms）毫秒延期雷管系列已研制成功并投入了应用。低能导爆索（3.0 g/m，1.5 g/m）、高能导爆索（34 g/m 及以上）、普通导爆索、油井导爆索和安全型导爆索等已形成了系列产品。为提高深孔爆破的起爆能量还研制了各种型号的起爆药具来满足生产需求。

我国民用爆破器材行业经过 60 多年的努力，特别是改革开放以来的迅速发展，已形成产品比较齐全、能力比较完备的工业体系，主要产品有工业炸药、工业雷管、工业导火索、工业导爆索、非电导爆管系统、起爆药、爆破剂、震源器材、油气井爆破器材和起爆药具等多个品种，基本满足在冶金、煤炭、水电、土建、铁路、交通、航运、石油、天然

气及机械制造等工业部门的建设与生产需要。

1.2 爆破技术的发展及其在国民经济中的作用

爆破是以工程建设为目的的技术，它直接为国民经济建设服务的各种工业生产和开挖施工提供重要的技术手段。目前，在冶金、煤炭等矿业部门的矿岩开挖，水电部门定向抛掷筑坝，土建中的基坑岩石的破碎和废旧建构物的拆除，铁路交通的隧洞路堑开挖，航道的礁石疏通，石油油井的特殊处理，天然气储存硐室的建设，机械加工制造领域的爆炸复合和焊接、爆炸合成、爆炸硬化、特殊部件的爆炸加工等国民经济工程建设和生产领域均取得了广泛的应用，其具体应用范围如图 1-1 所示。下面主要就硐室爆破、深孔爆破和拆除爆破在我国发展情况做一个简要的回顾。



图 1-1 现代爆破技术应用范围

硐室爆破在我国矿山、铁路、公路、水利水电、机场的建设中均有应用，炸药量也从几百公斤到上万吨。新中国成立以后万吨级的硐室爆破仅有 3 次，其中最大的一次是 1956 年我国甘肃省白银厂露天矿建设的剥离硐室爆破，其炸药量达 1.564×10^4 t，爆破方量为 9.077×10^6 m³，也是我国首次万吨级硐室大爆破；1992 年 12 月 28 日广东省珠海炮台山非矿山的填海抛掷硐室爆破，总药量为 1.2×10^4 t，一次性破碎和抛掷方量达 1.0852×10^7 m³，有效抛掷率为 51.36%，控制方向的飞石不超过 300 m，临近爆区 600 m 的民房无倒塌，达到了设计要求。新中国成立后达到千吨级的硐室爆破，见表 1-1。

表 1-1 我国达到千吨级的硐室爆破

序号	年份	地 点	爆破类型	爆破量/ ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	炸药总量/ t	单耗/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抛掷率/%
1	1956	甘肃白银厂露天矿	加强松动和抛掷	907.7	15640	1.46	25.1
2	1964	甘肃金川镍矿	加强松动	218.4	1655	0.724	
3	1969	广东南水电站	定向抛掷爆破	100	1394		
4	1971	攀枝花狮子山铁矿	分层加强松动	1140	10162	0.817	
5	1973	陕西省石峪水库	定向抛掷爆破	136	1575		
6	1978	江西永平铜矿	加强松动	114.2	1001	0.69	
7	1985	福建顺昌洋菇山	抛掷爆破	122.2	1702	1.4	84.2
8	1991	广东惠州芝麻州	定向抛掷爆破	1082	3750		
9	1992	广东省珠海炮台山	加强松动和抛掷	1085.2	12000	0.817	51.36
10	1992	广东马鞭州第二炮	一侧抛掷，一侧松动	118	1350	1.14	49.6
11	1993	广东省珠海铁头嘴山	定向抛掷爆破	127	1165.5	0.88	42.8
12	1994	贵州贵阳龙登堡机场	松动爆破	225	3010	1.18	
13	1995	福建漳州经济开发区	松动爆破	181	1240	0.829	
14	1997	福建上杭紫金山金矿	抛掷爆破	125	1036	0.829	62.6
15	2002	首钢大石河铁矿	抛掷爆破	181	1301	0.728	60
16	2007	宁夏汝箕沟矿区		633	5500		

尽管硐室爆破所需设备简单，施工速度快且不受地形和气候条件影响，但是爆破药量集中，爆炸能量也很不均匀，使得爆破危害（爆破地震、爆破空气冲击波、爆破飞石等）难以控制，大块率很高，二次破碎量增加，大大地降低了劳动生产率，同时爆破施工的劳动条件极差。因此，随着科学技术的发展和设备的改善与提高，深孔爆破在大规模爆破中越来越得到了重视，它不仅广泛应用于地下矿山、铁路、公路、水利水电的爆破工程中，还应用于采石场、工业广场平整、露天矿山的剥离和采矿中，它在我国大型工程建设中取得了举足轻重的地位。

拆除爆破是指采用爆破的方法对建（构）筑物进行拆除的控制爆破，这种控制爆破技术是第二次世界大战之后才迅速发展起来的一项爆破新技术。该技术在城市改造和工矿企业改建、扩建等方面发挥了重要的作用。我国在拆除爆破方面起步较早，1958年东北工学院首次用爆破方法拆除了120 m高的钢筋混凝土烟囱；同年，为修建北京人民大会堂、历史博物馆，工程兵用密孔爆破法拆除了旧银行金库及银行大厦基础，开了我国拆除爆破的先河。1973年，北京铁路局和铁道科学研究院合作拆除旧北京饭店约2200 m³钢筋混凝土结构的地下室。1976年，中国人民解放军工程兵学院和南京工程兵学院协作，拆除天安门广场两侧总面积为1.2 × 10⁴ m²的3座大楼。1979年，铁道部第四勘察设计研究院采用水压爆破技术拆除长5.7 m、宽3.6 m、高2.7 m和壁厚0.5 m的钢筋混凝土滤水罐。进入20世纪80年代后，拆除爆破技术在全国得到了广泛的推广应用，许多科研单位、高等院校将爆破理论与实践相结合，使拆除建（构）筑物的复杂性、拆除的高度、

一次拆除的面积等都在不断增加,拆除爆破技术在此阶段得到了飞速的发展。

目前,经过半个多世纪的发展,拆除爆破技术不仅能有效控制拆除物的倒塌方向和破碎程度,而且对爆破震动、空气冲击波、飞石等爆破有危害,现在以拆除速度快、安全性高、经济效益好、劳动强度低等优势,在我国现代化建设中已显示了强大的威力。表1-2即为我国近年来在拆除15层以上或近似此高度的一些成功爆破实例,表1-3即为我国近年来在拆除100 m以上烟囱的成功爆破实例。

表1-2 国内近年15层以上建筑物拆除爆破的部分实例

序号	时间	地点	工程名称	层数	高度/m	爆破孔数/个	药量/kg	承担单位
1	1995-12	武汉	武汉18层危楼	18	56	6000	300	
2	1999-03	上海	上海长征医院	18	67.3			上海同济
3	2001-09	北京	北京东直门16号楼	20	62.18	11007	362	北京中大
4	2003-01	南宁	南宁公安局办公楼	15	54.64	10587	221	广西大学
5	2003-10	新疆	鸿春园饭店	18	64.5			南京工程兵
6	2004-05	温州	中银大厦	22	93	3300	300	广东中人
7	2004	阜新	阜新市发电厂房		45	12094	1220	阜新工大

表1-3 我国近年拆除100 m以上烟囱的爆破部分实例

序号	时间	地点	高度/m	承担单位
1	1996-01	广东茂名炼油厂	120	广东宏大爆破公司
2	1996-01	广东茂名炼油厂	120	广东宏大爆破公司
3	1998-09-30	鞍钢发电厂	120	东北大学、辽宁省高科爆破公司
4	2001	云南宣威电厂	120	昆明理工大学、云南天宇爆破公司
5	2001-08-18	广西合山电厂	120	铁道部铁道科学研究院
6	2002	天津大港发电厂	120	铁科院北京铁锋爆破公司
7	2004	辽宁沈阳	120	
8	2003-12	浙江温州镇海电厂	150	广东宏大爆破公司
9	2004	湖北武汉	100	
10	2005	广东广州	100	广东宏大爆破公司
11	2008-11	彭州煤矸石电厂	120	四川铁建爆破工程有限公司
12	2010-01	华润电力鲤鱼江电厂	120	

2 炸药及爆炸的基本理论

2.1 爆炸现象及其特征

爆炸是指在适宜的条件下,某些物质发生急剧的物理和化学变化,其内部的能量瞬间释放,并借助系统内原有气体或爆炸后生成气体的膨胀,对系统周围介质做功,使之发生冲击破坏效应的现象。

爆炸可以由各种不同的物理现象或化学现象所引起。就爆炸引起的原因和特征,爆炸现象大致可分为物理爆炸、核爆炸和化学爆炸。

(1) 物理爆炸。由于物态变化(如蒸汽锅炉或高压气瓶、地震、强火花放电等)所引起的爆炸叫物理爆炸。该爆炸是由内部压力或物态发生剧烈变化引起的;其特征是爆炸过程中只是物态发生了变化,其物质的化学成分和性质并没有改变。

(2) 核爆炸。由于某些具有放射性物质产生的核裂变(如 U^{235} 的裂变)或核聚变(如氘、氚、锂核的聚变)反应所释放出的核能所引起的爆炸叫核爆炸。该爆炸是由于原子发生了核裂变或核聚变,释放出大量的能量引起的;其特征是其物质的原子发生了改变。

(3) 化学爆炸。由于物质变化时发生极为迅速的放热化学反应(如细煤粉悬浮于空气中的爆燃、炸药爆炸等),生成高温高压的气体产物,而引起的爆炸叫化学爆炸。该爆炸是由物质的分子发生了化学变化,且放出了大量的热和气体产物引起的;其特征是其物质的分子结构发生了改变。

2.2 炸药及其相关概念

炸药是一种相对稳定的系统,在一定外界条件下,能够发生快速化学反应,放出热量,生成大量气体产物,显示爆炸效应的化合物或混合物。

2.2.1 炸药爆炸的三要素

放出大量热量、产生大量的气体产物和能自动传播的高速化学反应是出现爆炸现象的3个必要条件,一般称为炸药爆炸三要素。这3个条件正是任何化学反应成为爆炸性反应必备的,三者互相关联、缺一不可。

(1) 放出大量热量。反应过程的放热性是爆炸现象发生的首要条件,它是对外做功的能源。(如硝酸铵在常温到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时是吸热的分解反应,就不会发生爆炸;当把它加热到近 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,虽然发生了放热的分解反应,但放出的热量不大,不足以形成爆炸;当把它迅速加热到 $400\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或在爆轰波激发下,就会提高硝酸铵的放热效应,而形成爆炸。)

(2) 产生大量的气体。由于气体具有远远超过固体和液体的压缩比与膨胀系数,因此炸药爆炸就是利用气体的可压缩性和膨胀性,将释放出的热量转化为对外做功的机械能,即气体是炸药爆炸对外做功不可缺少的中间媒介条件。(如铝热反应,它产生化学反

应时所释放出来的热量大于一般炸药，反应速度也很快，但由于不能生成大量的气体产物，不能把热能转化为机械功，所以这种物质的化学反应就不具有爆炸性。)

(3) 能自动传播的高速反应过程。炸药爆炸反应中，在反应区内炸药变成气体产物的时间只需要 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ s，在这样短的时间内所生成的气体和能量均聚集在原炸药占据的空间中来不及扩散，使气体的压力和温度急剧上升，形成很高的能量密度而产生爆炸。这是爆炸反应区别燃烧及其他化学反应的一个显著特点。

因此，放热性是给炸药爆炸提供了能源；反应生成的大量气体是为炸药爆炸对外做功提供了工作媒介；快速的化学反应则是使炸药爆炸释放出的有限能量集中在有限空间的必要条件。它们三者之间是相互联系、互为条件的，体现了炸药爆炸的共同特性。

2.2.2 炸药组成特点和爆炸机理

1. 炸药组成特点

(1) 炸药是能发生自身燃烧和爆炸反应的物质（自带氧的物质）。即炸药本身含有化学反应最终产物 CO_2 和 H_2O 时的必要元素碳、氢、氧等，使炸药发生化学反应时不需要外界任何其他物质参与即可完成。

(2) 炸药是具有相对稳定的物质系统。即炸药应具有一定的稳定性，不能是一触即发的危险物品，只有达到一定条件后才能使其产生爆炸反应。因此，炸药才能安全生产、运输、储存和使用。

(3) 炸药的能量全部存储于分子结构中，也就是说炸药的分子要具有爆炸结构。这种结构分子发生爆炸反应所释放出的能量，能使其他分子自动活化形成自持式的爆轰反应。

(4) 炸药是具有高能量密度的物质。炸药和一般燃料相比，单位重量的炸药爆炸后所放出的热量并不比一般燃料燃烧后所放出的热量多，但是以反应产物单位时间体积能量计算，则炸药却大大高于一般燃料。

2. 炸药爆炸机理

炸药在一定条件下之所以能够发生化学爆炸，是因为组成炸药的化学分子中包含有比较活泼的氧化剂和可燃剂。对一个化合物分子来说，氧化剂是指分子中的含氧基团，可燃剂是指分子中含碳、氢的基团。这两种基团都是反应性很强的活性原子基团，在一般情况下，它们在分子中被活性小的中性原子基团或原子分隔，但当炸药分子被外界能量活化时，分子运动速度增大，分子之间的碰撞增强，致使炸药分子破裂，释放出活性基团，因此它们之间相互发生化学反应，以热能形式释放出其内部所含的化学能，并借助迅速膨胀的气体产物，把能量传递给周围介质而做功，这就是炸药的爆炸机理。

根据上述炸药组成的特点和爆炸机理，炸药虽然属于不稳定体系的物质，但在不受外界作用的条件下，炸药是稳定的，不会发生爆炸，因而，炸药才能安全的生产、运输、存储和使用。所以，炸药是既具有相对稳定性而又带有不稳定因素的矛盾的统一体，研究炸药就是要研究和掌握炸药不稳定的条件以及了解使炸药稳定的因素，从而找出炸药安全使用的技术规则，为人类谋福利。

2.2.3 炸药化学反应的基本形式

炸药爆炸并不是炸药唯一的化学反应形式。由于环境和引起炸药化学反应的条件不

同，同种炸药可能有缓慢分解、燃烧反应和爆炸反应 3 种不同形式的化学变化。这 3 种化学反应形式进行的速度不同，生成产物和热效应也不同。

1. 缓慢分解反应

炸药与一般化合物一样，在常温、常压下部分分子均能发生缓慢的化学分解反应，环境温度越高，其分解速度也越快。

缓慢分解反应的特点：反应是在全部炸药中进行，炸药内部各点的温度相同，没有集中的反应区，环境温度对其反应速度影响较大。缓慢分解反应一般都伴随热量的释放，如果所释放的热量又不能及时散发出去，累积起来的热量就会使炸药的温度升高，从而加快了炸药的分解反应的速度，就会释放出更多的热量，致使炸药的环境温度更高，如此循环往复就会产生热量的累积，最终导致反应形式的升级，造成炸药的燃烧或爆炸。

炸药缓慢分解反应反映了炸药的化学安定性指标，所以在炸药存储时储存量不宜过多、堆放不宜过密过紧，而且库房内温度不宜过高，要注意通风，防止炸药因温度过高，导致分解反应加速而产生燃烧或爆炸事故的发生。

2. 燃烧反应

炸药在热的作用下可以燃烧，并以一定的速度在炸药内传播，而且这种燃烧不需要外界供氧就可以进行。

燃烧反应的特点：反应不是在全部分药中同时发生，而只是在炸药局部区域内进行，但是它可以在炸药中自动传播。开始发生燃烧的面称为焰面，焰面的传播速度称为燃烧速度。炸药燃烧主要靠热传导来传递能量，燃烧速度不会很高，一般为几毫米每秒到几米每秒，最高能达到几百米每秒，但都低于炸药的声速。

炸药在燃烧过程中，若燃烧速度保持稳定，不发生波动，这样的燃烧称为稳定燃烧，否则为不稳定燃烧。炸药燃烧速度能否保持稳定，决定于燃烧过程中的热平衡，如果燃烧释放的热量与传导到炸药邻层和周围介质散失的热量相等，则燃烧就能稳定进行，否则燃烧速度加快或降低，形成爆炸或缓慢分解反应。

根据燃烧的特性，炸药可分为起爆药、猛炸药和火药三大类。起爆药一旦燃烧，化学反应非常迅速，因此燃烧很不稳定，非常容易转化成爆炸；猛炸药一般能稳定燃烧，但在一定条件下又可以很快转化成爆炸；火药燃烧的稳定性最好，一般不会爆炸，但在特殊条件下也能爆炸。

因此，当炸药燃烧时所生成的气体和热量不能及时排出时，燃烧反应就可以转化成爆炸，这一点在炸药焚毁时要特别注意。

3. 爆炸反应

炸药在冲击、摩擦或热作用下能形成爆炸。爆炸的反应过程和燃烧相类似，都是可燃元素的氧化反应，反应也只在局部区域内进行，且能在炸药内部自动传播。

爆炸反应和燃烧反应的主要区别：燃烧靠热传导来传递能量和激起化学反应，受环境条件影响较大，而爆炸反应则依靠压缩冲击波的作用来传递能量和激起化学反应，基本上不受环境条件的影响。爆炸反应比燃烧反应更为激烈，单位时间放出的热量与形成的温度也更高。燃烧时产物的运动方向与反应区的传播方向相反，而爆炸时产物运动方向则与反应区的传播方向相同。因此，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，而爆炸速度则是超音速。爆炸反应传播速度保持在稳定时化学反应称为爆

轰，爆轰是炸药反应的最高形式，人们利用炸药做功就是利用炸药爆轰的特性。

上述炸药的化学反应形式，在一定条件下，都是能够相互转化的。缓慢分解可以发展为燃烧、爆炸；爆炸也能转化为缓慢分解。但是炸药的反应形式无论向那个方向转化，都会给安全使用带来极大的隐患，造成重大的安全事故。

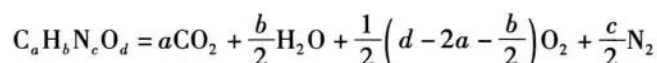
2.3 炸药的氧平衡及爆炸反应方程

2.3.1 炸药的氧平衡

1. 氧平衡的概念

炸药主要由碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）元素组成，其中碳、氢是可燃元素，氧是助燃元素，氮是载氧体。炸药的爆炸过程实质上是可燃元素与助燃元素发生极为迅速和猛烈的氧化还原反应的过程，而且氧元素由炸药自身提供。放热量最大，生成产物最稳定的氧化反应称为理想的氧化反应。若炸药内含有足量的氧，按理想的氧化反应生成的产物应为 H_2O 、 CO_2 和一些其他游离产物；若含氧量不足，则生成物中除了 H_2O 、 CO_2 、 N_2 以外，还有 CO 、 H_2 和固体碳颗粒以及其他氧化不完全的产物。每种炸药里都含有一定数量的碳、氢原子，也含有一定数量的氧原子，发生化学反应时就会出现碳、氢、氧的数量不完全匹配的情况。氧平衡是研究氧与可燃元素的平衡问题，也就是研究炸药内含氧量使可燃元素完全氧化所需氧量之间的关系。

炸药中的含氧量与能够把可燃元素完全氧化所需氧量之间的关系叫炸药的氧平衡。一般来说，对于含有碳、氢、氧、氮的单质炸药和混合炸药，其通式可写为 $C_aH_bN_cO_d$ 。发生爆炸时，可燃元素碳、氢元素完全氧化的反应式为



根据上式反应式，氧平衡可分为 3 类：

（1）炸药中的氧量除了把可燃元素完全氧化外，尚有剩余，即 $d > 2a + \frac{b}{2}$ 的炸药称为正氧平衡的炸药。

（2）炸药中的氧量刚好把可燃元素完全氧化，而没有剩余，即 $d = 2a + \frac{b}{2}$ 的炸药称为零氧平衡的炸药。

（3）炸药中的氧量不能把可燃元素完全氧化，即 $d < 2a + \frac{b}{2}$ 的炸药称为负氧平衡的炸药。

大量的实验证明：只有当炸药中的碳和氢原子全部被氧化成 CO_2 和 H_2O 时，其放出的热量最大，生成的有毒有害气体量最小，即零氧平衡时的情况。

正氧平衡的炸药未能充分利用其中氧量。剩余的氧和本来应该游离的氮化合生成氮氧化合物，其中 NO 是瓦斯爆炸反应的催化剂，因此是有害的。 NO_2 和 N_2O_3 都对人体有毒，而且由于它们比空气重，爆破后容易聚存于煤岩爆堆的间隙内，不易被新鲜空气吹散和稀释。人吸入体内后对人体的内脏器官有严重损害。当空气中 NO_2 浓度达到 0.5 mg/L 时，数分钟人就可以死亡，因此对氮氧化合物的浓度井下要严格控制。另外，氮氧化合物生成

时要吸收大量的热量,这也会影响炸药能量的有效利用。

负氧平衡的炸药因含氧量不够,未能把可燃元素全部氧化,会生成 CO (俗称煤气),既有毒又有害,吸入人体后会和血红蛋白迅速结合,使人体的血液丧失载氧能力,甚至窒息死亡。另外,CO 属于可燃气体,在井下可以产生二次火焰,浓度适宜时还可造成爆炸。因此,井下空气中 CO 的浓度在《爆破安全规程》(GB 6722—2003)中作了严格的限制。

由此可见,氧平衡对炸药的爆炸性能、放出热量、生成气体的组成和体积、有毒气体含量、爆温、二次火焰及做功效率等都有多方面的影响。

2. 氧平衡的计算

炸药的氧平衡在数值上用氧平衡率表示。若炸药中主要含有碳、氢、氮、氧元素,其通式为 $C_aH_bN_cO_d$, 则单质炸药的氧平衡率为

$$K_b = \frac{d - \left(2a + \frac{b}{2}\right)}{M} \times 16 \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 M ——炸药的分子量;

a 、 b 、 c 、 d ——炸药中的碳、氢、氮、氧元素的原子个数。

对于混合炸药是以 1 kg 计,其氧平衡率为

$$K_b = \frac{d - \left(2a + \frac{b}{2}\right)}{1000} \times 16 \times 100\% \quad (2-2)$$

混合炸药按各组分百分率与其氧平衡乘积的总和来计算为

$$K_b = \sum m_i k_{bi} \quad (2-3)$$

式中 m_i 、 k_{bi} ——第 i 组分的百分率与其氧平衡。

一些炸药及常用组分的氧平衡值,见表 2-1。

对于煤矿许用炸药,由于炸药组分中有惰性盐,只要大制定出其用量就可以了,不考虑其对氧平衡的影响。

【例 2-1】计算梯恩梯 (TNT) 和硝酸铵的氧平衡。

解 将梯恩梯的通式写为 $C_7H_5N_3O_6$, 即 $a=7$ 、 $b=5$ 、 $c=3$ 、 $d=6$ 、 $M=227$ 。由式 (2-1) 得 TNT 的氧平衡率为

$$K_b = \frac{1}{227} [6 - (2 \times 7 + 5/2)] \times 16 \times 100\% = -74\%$$

硝酸铵的通式为 $C_0H_4N_2O_3$, 即 $a=0$ 、 $b=4$ 、 $c=2$ 、 $d=3$ 、 $M=80$ 。其氧平衡率为

$$K_b = \frac{1}{80} [3 - (2 \times 0 + 4/2)] \times 16 \times 100\% = 20\%$$

【例 2-2】计算阿梅托 50/50 (质量百分比), 计算梯恩梯和硝酸铵各占 50% 炸药的氧平衡。

解 1 kg 阿梅托炸药中含梯恩梯和硝酸铵各 0.5 kg, 则梯恩梯的摩尔数为 $500/227 \text{ mol} = 2.2 \text{ mol}$, 硝酸铵的摩尔数为 $500/80 \text{ mol} = 6.25 \text{ mol}$, 炸药通式为



根据上述通式,代入式 (2-2) 中,阿梅托的氧平衡为

$$K_b = \frac{1}{1000} [31.95 - (2 \times 15.4 + 36/2)] \times 16 \times 100\% = -27\%$$

或者根据式 (2-3), 其中 $m_1 = m_2 = 50\%$, 查表 2-1 可知, $K_{b1} = -74\%$, $K_{b2} = 20\%$, 则有

$$K_b = \sum m_i k_{bi} = 50\% \times (-74\%) + 50\% \times 20\% = -27\%$$

表 2-1 一些常用炸药和物质的氧平衡

物质名称	分子式	原子量或分子量	氧平衡/%
硝酸铵	NH_4NO_3	80	20.0
硝酸钾	KNO_3	101	39.6
硝酸钠	NaNO_3	85	47.0
乙二醇	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	62	-129.0
泰安 (PETN)	$\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$	316	-10.1
黑索今 (RDX)	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	222	-21.6
奥克托金 (HMX)	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	296	-21.6
特屈儿 (CE)	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_8$	287	-47.4
梯恩梯 (TNT)	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	227	-74.0
二硝基甲苯 (DNT)	$\text{C}_7\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_4$	182	-114.4
硝化棉 (NC)	$\text{C}_{24}\text{H}_{31}\text{N}_9\text{O}_{38}$	1053	-38.5
石蜡	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	254.5	-346.0
木粉	$\text{C}_{15}\text{H}_{22}\text{O}_{10}$	362	-137.0
轻柴油	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}$	224	-342.0
沥青	$\text{C}_{30}\text{H}_{18}\text{O}$	394	-276.0

2.3.2 炸药的爆炸反应方程

炸药爆炸后是以应力波和爆生气体对介质做功来实现作业目的。这就要求对炸药爆炸时的爆容、爆热、爆温、爆压等参数进行计算, 而确定这些参数的基础是要知道炸药爆炸后的爆轰产物的组成, 因此必须要研究和确定炸药的爆炸反应方程。炸药爆炸的特点决定了要精确建立炸药的爆炸反应方程是比较困难的, 这是因为: ①起爆条件不同, 爆炸产物的组分不同; ②炸药密度不同, 爆炸产生的温度、压力以及产物也不一样; ③炸药本身的配比、粒度、均匀程度、装药直径及外壳包装材料等都影响炸药爆炸反应的完全程度和产物的组成; ④爆炸反应大多是在高温高压下进行的, 其产物之间会发生多种形式的可逆二次反应。但是, 可以根据炸药内的含氧量的多少, 来判断反应发展趋势和主要生成产物的组成建立近似的反应方程式。在建立近似爆炸反应方程式中, 布伦克里和威尔逊提出的“在充分考虑高温条件下可能发生可逆平衡反应的同时, 以最大放热量为原则的方法最为实用”。根据这一方法将炸药分为 3 类: 第一类炸药为零氧平衡和正氧平衡炸药, 即 $d \geq 2a + \frac{b}{2}$; 第二类炸药为只生成气体产物的负氧平衡炸药, 即 $2a + \frac{b}{2} > d \geq a + \frac{b}{2}$; 第三类炸药为可生成固体颗粒碳的严重负氧平衡的炸药, 即 $d < a + \frac{b}{2}$ 。

(1) 第一类炸药的生成产物被充分氧化, 即氢原子全部被氧化成水, 碳原子全部被