



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 爆破工程

刘殿书 李胜林 主编

BLASTING  
ENGINEERING



科学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 爆破工程

刘殿书 李胜林 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分10章，内容包括：爆炸与爆破、炸药理论、工业炸药、爆破网路、岩石的爆破机理、地下爆破、露天爆破、拆除爆破、爆破安全和凿岩理论与机具。

本书可作为高等院校土木工程、采矿工程、安全工程专业本科生的教材，也可供其他相关专业教学选用，研究生和爆破工程技术人员也可参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

爆破工程 / 刘殿书, 李胜林主编. —北京: 科学出版社, 2011  
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)  
ISBN 978-7-03-031664-6

I. ①爆… II. ①刘… ②李… III. ①爆破技术-高等学校-教材  
IV. ①TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 117664 号

---

责任编辑: 王淑兰 / 责任校对: 耿 耘  
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年6月第一版 开本: 787×1092 1/16

2011年6月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—3000 字数: 280 000

**定价: 25.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137050

**版权所有, 侵权必究**

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

随着 20 世纪 90 年代以来的本科教育专业调整，原煤炭、冶金等系统的院校中一些本科专业纳入了土木工程、采矿工程等专业的教学之中，形成了具备行业特色的“大”土木工程、“大”采矿工程专业，与行业有关的“钻眼爆破”、“凿岩爆破”等爆破课程名称也逐步统一为“爆破工程”，课程时数和教学内容都有了较大调整。为适应大土木工程、大采矿工程专业本科教学之需要，编者根据多年的教学和工作经验编写了本书。

本书从本科教学要求出发，系统地介绍了爆破工程所涉及的基础理论和常用工程技术，内容包括：爆炸与爆破、炸药理论、工业炸药、爆破网路、岩石的爆破机理、地下爆破、露天爆破、拆除爆破、爆破安全、凿岩理论与机具。本书在保持理论和技术的系统性和完整性的基础上，力求语言简练和工程实用。

本书由刘殿书、李胜林任主编。具体编写分工如下：李胜林编写第 1 章、第 2 章和第 7 章；刘殿书编写第 3 章、第 4 章和第 5 章；高全臣编写第 6 章；陈寿峰编写第 8 章；万寿林编写第 9 章；单仁亮编写第 10 章。王树仁教授和杨永琦教授审阅了全书并提出了宝贵的修改意见。

中国矿业大学的爆破工程教学与科研已经有半个多世纪的历史，历经几代人的传承和发展，本书也凝聚了前辈们的教学、研究成果和辛勤劳动。

编者水平有限，书中的错误和不当之处，恳请读者批评指正。

编者邮箱：lds@cumtb.edu.cn

编 者

2010.12.21

# 目 录

第 1 章 爆炸与爆破 .....	1
1.1 爆炸 .....	1
1.2 炸药爆炸 .....	1
1.2.1 炸药及其特性 .....	1
1.2.2 炸药爆炸的特征 .....	2
1.2.3 炸药化学变化的形式 .....	2
1.3 爆破 .....	4
1.3.1 爆破方法的分类 .....	4
1.3.2 爆破作业的特点 .....	5
1.3.3 爆破工程作业流程 .....	6
思考题 .....	7
第 2 章 炸药理论 .....	8
2.1 炸药的氧平衡 .....	8
2.1.1 氧平衡的概念 .....	8
2.1.2 氧平衡的计算 .....	8
2.1.3 含有其他元素时氧平衡的计算原则 .....	9
2.1.4 氧平衡的分类 .....	9
2.2 爆炸反应方程 .....	10
2.2.1 爆炸反应方程的近似写法 .....	10
2.2.2 有害气体 .....	11
2.3 炸药的热化学参数 .....	11
2.3.1 爆容 .....	12
2.3.2 爆热 .....	12
2.3.3 爆温 .....	14
2.3.4 爆压 .....	16
2.4 炸药的起爆与感度 .....	16
2.4.1 起爆能 .....	16
2.4.2 炸药的起爆机理 .....	17
2.4.3 热感度 .....	18
2.4.4 机械感度 .....	19
2.4.5 爆轰感度 .....	22
2.4.6 冲击波感度和殉爆 .....	22
2.4.7 静电感度 .....	23

2.5	炸药的爆炸性能 .....	23
2.5.1	炸药的密度 .....	23
2.5.2	爆速 .....	24
2.5.3	猛度 .....	25
2.5.4	爆力 .....	26
2.6	炸药的爆轰 .....	28
2.6.1	冲击波 .....	28
2.6.2	爆轰波方程 .....	32
2.6.3	爆轰波稳定传播的条件 .....	33
2.6.4	爆轰参数的计算 .....	34
	思考题 .....	36
<b>第3章</b>	<b>工业炸药 .....</b>	<b>37</b>
3.1	工业炸药的分类 .....	37
3.2	乳化炸药 .....	38
3.2.1	乳化炸药的组分 .....	38
3.2.2	乳化炸药的主要特性 .....	40
3.2.3	粉状乳化炸药 .....	41
3.3	铵油炸药 .....	42
3.3.1	铵油炸药的成分 .....	42
3.3.2	粉状铵油炸药 .....	43
3.3.3	多孔粒状铵油炸药 .....	43
3.3.4	重铵油炸药 .....	44
3.3.5	改性铵油炸药 .....	45
3.3.6	膨化硝酸铵炸药 .....	46
3.4	其他工业炸药 .....	47
3.4.1	铵梯炸药 .....	47
3.4.2	水胶炸药 .....	48
3.4.3	胶质硝化甘油炸药 .....	48
3.4.4	低爆速炸药 .....	49
3.5	煤矿许用炸药 .....	49
3.5.1	煤矿许用炸药的特点 .....	49
3.5.2	煤矿许用炸药的分级 .....	50
3.5.3	常用煤矿许用炸药 .....	50
3.6	常用单质炸药 .....	51
	思考题 .....	52
<b>第4章</b>	<b>爆破网路 .....</b>	<b>53</b>
4.1	起爆方法 .....	53
4.2	工业雷管 .....	53
4.2.1	分类 .....	53

4.2.2	火雷管 .....	54
4.2.3	电雷管 .....	54
4.2.4	导爆管雷管 .....	56
4.3	电爆网路 .....	57
4.3.1	网路组成 .....	57
4.3.2	准爆条件 .....	60
4.4	导爆管网路 .....	61
4.4.1	塑料导爆管 .....	61
4.4.2	雷管接力网路 .....	61
4.4.3	四通连接网路 .....	64
4.4.4	混合网路 .....	66
4.5	导爆索网路 .....	67
	思考题 .....	69
<b>第 5 章</b>	<b>岩石的爆破机理 .....</b>	<b>70</b>
5.1	岩石的动态性能 .....	70
5.2	岩石的可爆性 .....	72
5.2.1	普氏岩石坚固性分级 .....	72
5.2.2	A. H. 哈努卡耶夫按波阻抗分级 .....	72
5.2.3	B. H. 库图佐夫综合可爆性分级 .....	73
5.3	岩体中爆炸应力波 .....	73
5.3.1	爆炸应力波的传播 .....	73
5.3.2	冲击波 .....	74
5.3.3	应力波 .....	76
5.3.4	应力波的反射 .....	77
5.3.5	动态应力场 .....	78
5.4	爆破作用 .....	79
5.4.1	爆破的内部作用 .....	79
5.4.2	爆破的外部作用 .....	81
5.5	爆破漏斗 .....	81
5.5.1	爆破漏斗的形式 .....	81
5.5.2	爆破漏斗的药量计算 .....	82
5.6	岩石爆破机理 .....	83
5.6.1	岩石爆破的三种理论 .....	83
5.6.2	爆破作用的三个阶段 .....	84
5.6.3	岩石破坏的五种模式 .....	85
5.6.4	岩石爆破机理的定性描述 .....	86
5.7	利文斯顿爆破漏斗理论 .....	86
5.7.1	基本观点 .....	86
5.7.2	$V/Q-\Delta$ 曲线与弹性变形方程 .....	87

5.8 影响爆破作用的因素 .....	88
5.8.1 炸药性能的影响 .....	88
5.8.2 岩石特性的影响 .....	88
5.8.3 爆破条件、工艺的影响 .....	89
思考题 .....	91
<b>第6章 地下爆破</b> .....	<b>93</b>
6.1 概述 .....	93
6.2 掏槽爆破 .....	94
6.2.1 掏槽形式 .....	94
6.2.2 斜孔掏槽 .....	95
6.2.3 直孔掏槽 .....	97
6.2.4 立井掏槽 .....	98
6.3 井巷掘进爆破 .....	99
6.3.1 单位炸药消耗量 .....	99
6.3.2 炮孔直径和装药直径 .....	100
6.3.3 炮孔深度 .....	101
6.3.4 抵抗线与炮孔间距 .....	102
6.3.5 炮孔数目 .....	103
6.3.6 装药量 .....	103
6.3.7 爆破说明书与爆破图表 .....	104
6.4 光面和预裂爆破 .....	105
6.4.1 光面和预裂爆破机理 .....	105
6.4.2 孔间起爆时差的影响分析 .....	107
6.4.3 药量计算 .....	108
6.5 地下采矿爆破 .....	109
6.5.1 地下采矿爆破特点 .....	109
6.5.2 浅孔爆破 .....	110
6.5.3 深孔爆破 .....	111
6.5.4 VCR 爆破 .....	114
6.5.5 束状深孔爆破 .....	114
思考题 .....	115
<b>第7章 露天爆破</b> .....	<b>116</b>
7.1 露天浅孔爆破 .....	116
7.2 深孔台阶爆破 .....	117
7.2.1 台阶要素和炮孔参数 .....	117
7.2.2 深孔爆破参数设计 .....	118
7.2.3 起爆顺序 .....	121
7.2.4 毫秒延期间隔时间的确定 .....	122

---

7.3 硇室爆破 .....	124
7.3.1 爆破类型选择 .....	125
7.3.2 药包布置原则 .....	125
7.3.3 抵抗线与药包间距 .....	127
7.3.4 $K$ 值的确定 .....	127
7.3.5 装药量计算 .....	128
7.3.6 爆破漏斗计算 .....	128
思考题 .....	130
<b>第8章 拆除爆破</b> .....	<b>131</b>
8.1 拆除爆破原理 .....	131
8.1.1 概述 .....	131
8.1.2 拆除爆破的要求 .....	131
8.1.3 拆除爆破原理 .....	132
8.2 药量计算 .....	133
8.2.1 药量计算原理 .....	133
8.2.2 柱体爆破 .....	133
8.2.3 墙体爆破 .....	135
8.3 楼房拆除爆破 .....	136
8.3.1 定向倒塌 .....	136
8.3.2 折叠倒塌 .....	137
8.3.3 原地坍塌 .....	138
8.3.4 逐段解体 .....	138
8.4 高耸建(构)筑物拆除爆破 .....	140
8.4.1 倒塌条件 .....	140
8.4.2 爆破参数 .....	141
思考题 .....	143
<b>第9章 爆破安全</b> .....	<b>144</b>
9.1 爆破振动 .....	144
9.1.1 爆破振动的特征 .....	144
9.1.2 爆破振动的计算 .....	145
9.1.3 爆破振动安全允许值 .....	146
9.1.4 降低爆破振动的技术措施 .....	146
9.2 爆破飞石 .....	147
9.2.1 爆破飞石产生的原因 .....	147
9.2.2 爆破飞石的安全距离 .....	147
9.2.3 爆破飞石的控制 .....	148
9.3 爆破冲击波 .....	148
思考题 .....	150

---

---

<b>第 10 章 凿岩理论与机具</b> .....	151
10.1 钻孔方法 .....	151
10.2 破岩（凿岩）机理 .....	152
10.2.1 冲击破岩机理 .....	152
10.2.2 切削破岩机理 .....	155
10.2.3 滚压破岩机理 .....	156
10.3 常用钻孔机械 .....	157
10.3.1 凿岩机 .....	157
10.3.2 凿岩钻车 .....	160
10.3.3 潜孔钻机 .....	161
10.3.4 牙轮钻机 .....	162
思考题 .....	164
<b>附录</b> .....	165
<b>参考文献</b> .....	179

# 第 1 章 爆炸与爆破

## 1.1 爆 炸

自然界中存在各种各样的爆炸现象。从广义上讲，爆炸是指物质系统一种极为迅速的能量转化过程，是系统蕴藏的或瞬间形成的大量能量在极短的时间内骤然释放或转化的现象。在这种能量骤然释放或急剧转化的过程中，物质系统的能量转化为高压作用、声响以及光和热辐射等。

爆炸作用过程包括两个阶段：在第一阶段，物质的潜能转化为强烈的压缩能；在第二阶段，压缩能急剧释放，并对外做功。爆炸同时具备的两个特征：①爆炸源具有极大的能量密度；②爆炸过程具有极快的能量释放速度。

按照爆炸过程的性质，爆炸现象可分为以下三类：

(1) 物理爆炸。由系统释放物理能引起的爆炸。物理爆炸发生仅是物理变化，爆炸前后物质形态虽发生急剧变化，但其性质和化学成分并没有改变，如蒸汽锅炉的爆炸。

(2) 化学爆炸。由物质化学变化（释放化学能）引起的爆炸。爆炸前后，物质形态发生急剧变化，且伴随有极迅速的化学反应，物质性质和化学成分都发生了变化，并有新物质产生，如炸药爆炸、瓦斯爆炸和煤尘爆炸等。

(3) 核爆炸。由核裂变或核聚变释放出巨大核能所引起的爆炸。核爆炸是更加剧烈的爆炸现象，并有光辐射和贯穿辐射，如原子弹和氢弹爆炸。

## 1.2 炸药爆炸

### 1.2.1 炸药及其特性

炸药泛指能够发生化学爆炸的物质，包括化合物和混合物。广义上来讲，火药、烟火剂、起爆药、推进剂等都属于炸药的范畴。一般所说的炸药是指用于爆破和军事爆炸的炸药。

炸药具有以下特性：

(1) 高能量密度。炸药是一种含能物质，主要体现在单位体积物质反应热值大，能量密度高。

(2) 强自行活化。炸药爆炸反应释放大量的能量，比反应活化能大得多，所以反应一旦开始，便可自行进行下去，直到反应完全。

(3) 亚稳定性。炸药是相对稳定的物质，能够承受一定强度的外界作用而不爆炸。

(4) 自供氧。炸药的爆炸反应是炸药分子或组分之间的氧化反应，不需要外界供给氧气。

### 1.2.2 炸药爆炸的特征

炸药在外界作用下，能够自行发生高速化学反应，在极短的时间内释放出大量的能量，并产生大量的气体，这一过程称为炸药爆炸。

炸药爆炸是一种剧烈的氧化反应，是一个化学变化过程，炸药通过爆炸反应释放的化学能变成爆炸反应物的热能和压力位能，对环境介质做功。

炸药爆炸具有以下三个特征：

(1) 反应的放热性。爆炸过程中放出的大量热能是产生爆炸的首要条件。

炸药反应只有在炸药自身提供能量的条件下才能自动进行。没有这个条件，爆炸过程根本不能发生，反应也不能自行延续，也就不可能出现爆炸过程的自动传播。

吸热反应或放热不足都不能形成爆炸。显然，依赖外界供给能量来维持其分解的物质，不可能具有爆炸的性质，一个反应是否具有爆炸性，与反应过程能否放出热量密切相关。

(2) 反应的快速性。反应的快速性是炸药爆炸过程区别于一般化学反应的最重要的标志。

虽然炸药的能量储藏值并不比一般燃料大，但由于反应过程的高速度，炸药爆炸所达到的能量密度是一般化学反应所无法比拟的。

只有极高的反应速度，产生极高的能量释放率，才能造成反应极高的能量密度。只有高速的化学反应，才能忽略能量转换过程中热传导和热辐射的损失，在极短的时间内将反应形成的大量气体产物加热到数千度，压力猛增到数万 MPa。高温高压气体迅速膨胀，具有巨大的做功功率和强烈的破坏作用。

(3) 生成大量气体。反应过程中有大量的气体产物生成是炸药爆炸的重要特征。

在爆炸过程中，气体产物是造成高压的原因，也是对周围介质做功的介质。由于气体具有很大的可压缩性和膨胀系数，在爆炸的瞬间处于强烈的压缩状态，从而形成很高的压力势能。该压力势能在气体膨胀过程中，迅速转变为机械能。

反应的放热性、快速性和生成大量的气体产物，这三个基本特征构成炸药爆炸的必要条件，称为炸药爆炸的三要素。反应过程的放热性提供了爆炸反应的能源，保障了爆炸反应的连续和传播；反应过程的高速度则使爆炸产物具有极高的能量密度和功率密度，产生大量的气体则是对周围介质做功的介质，爆炸产生的热量通过高温高压气体产物的剧烈膨胀实现能量转换。

### 1.2.3 炸药化学变化的形式

爆炸并非炸药唯一的化学变化形式。由于环境条件、化学反应的激发条件、炸药性质等的不同，炸药化学变化过程可能以不同的速度进行，在反应性质上也有很大的差异。炸药的化学变化形式有三种：分解、燃烧、爆炸（爆轰）。

#### 1. 分解

炸药在常温条件下会以缓慢速度进行分解反应，环境温度越高，分解越显著。

分解反应的特点是：炸药内部各点温度相同，反应在全部炸药中同时进行，没有集

中的反应区。

分解反应的速度受温度、浓度、压力等环境因素影响，既可以吸热，也可以放热，这取决于炸药类型和环境温度。当温度较高时，所有炸药的分解反应都伴随有热量放出，若放出的热大于散热时，热量聚集会引起反应自动加速，当温度升高到某一定值（爆点）时，热分解就转化为爆炸。

分解反应反映了炸药的化学安定性，影响炸药的储存和使用。

## 2. 燃烧

燃烧是可燃元素（如碳、氢等）激烈的氧化反应。炸药在热源作用下，也会产生燃烧，与其他可燃物的燃烧的区别仅在于炸药燃烧时不需要外界供氧。

与分解反应不同，炸药燃烧不是在全部分物质内同时展开的，而只在局部区域内进行。进行燃烧的区域称为燃烧区，或称为反应区。反应区以波的形式在炸药中向前传播，称为燃烧波，燃烧波的传播速度就是燃烧速度。

炸药燃烧时，燃烧产物向外部空间排出，燃烧反应区则向尚未反应的炸药内部传播，二者运动方向相反。炸药燃烧主要靠热传导来传递能量，因此燃烧速度不可能很高，一般是每秒几毫米至几百米，低于炸药内的声速。燃烧速度受环境条件影响，特别是压力和温度影响较大，也受炸药的结构、密度和外壳等因素的影响。

炸药在燃烧过程中，若燃烧速度保持定值就称为稳定燃烧，否则就称为不稳定燃烧。

炸药的快速燃烧称为爆燃，速度可达每秒数百米。

## 3. 爆炸（爆轰）

炸药爆炸的特点是反应区的压力、温度等发生突变，化学反应也只是在局部区域（即反应区）内进行并在炸药内传爆。反应区的传播速度称为爆速。

炸药爆炸以最大而稳定的爆速进行传爆的过程叫做爆轰。这是炸药所特有的一种化学变化形式，爆轰过程与外界的压力、温度等条件无关。

爆轰的传播速度是恒定的，爆炸的传播速度是可变的。就这个意义上讲，爆炸和爆轰并无本质上的区别，可以认为爆炸就是爆轰的一种形式，即不稳定的爆轰。

虽然炸药的爆炸与燃烧都是在炸药局部区域内进行且在其内部传播，但炸药的燃烧过程与爆轰过程有着本质的区别，主要表现在以下几个方面：

（1）传播的性质。燃烧靠热传导传递能量并激起化学反应，而爆炸则是靠瞬间产生的压缩冲击波的作用来传递能量并激起化学反应。

（2）速度。燃烧的传播速度大大低于爆轰波的传播速度。燃烧速度总是小于声波在原始炸药内的传播速度，而爆轰速度总是大于原始炸药内的声速。再者燃烧受环境影响较大，特别是压力条件影响，而爆炸基本上不受环境条件影响。

（3）产物的运动方向。燃烧产物的运动方向与反应区传播方向相反，而爆炸产物的运动方向则与反应区传播方向相同，后者因而可产生很高压力，而火焰区域内燃烧产物的压力大大低于在爆轰波后面的压力。

（4）对外界的作用。燃烧点压力升高不大，在一定条件下才对周围介质产生爆

破作用。爆炸点有剧烈的压力突跃，无须封闭系统便能对周围介质产生强烈的爆破作用。

炸药的上述三种化学变化形式在一定条件下能够相互转化，热分解可发展为燃烧、爆炸。反之，爆炸也可转化为燃烧和热分解。

## 1.3 爆 破

### 1.3.1 爆破方法的分类

爆破是指利用炸药的爆炸能量对介质做功以达到预定工程目标的作业。

人类对爆炸的研究与应用渊源于我国黑火药的发明（约公元 7 世纪）和发展，10 世纪，我国已经将黑火药用于军事和烟火。大约在 11~12 世纪时，黑火药开始传入阿拉伯国家，后（13 世纪）传入欧洲。1627 年在匈牙利一水平巷道掘进时，首次将黑火药用于破坏岩石，这是第一次使用火药来替代人的体力劳动。1670 年以后，爆破技术在欧洲得到了广泛的应用。一直到 1865 年瑞典化学家阿尔弗雷德·诺贝尔（Alfred Nobel）发明了以硝化甘油为主要组分的代纳迈特（Dynamite）炸药之后，爆破才真正进入了工业化时代。差不多就在诺贝尔发明代纳迈特的时候，奥尔森（Olsson）和诺宾（Norrbein）于 1867 年发明了硝酸铵和各种燃料制成的混合炸药，奠定了硝酸类炸药与硝甘类炸药竞争发展的基础。进入 20 世纪后，爆破器材和爆破技术得到了进一步的发展。1919 年出现了导爆索，1927 年在瞬发雷管的基础上成功研制了秒延期电雷管。1956 年库克发明了浆状炸药，解决了硝酸炸药防水的问题，其后又研制和推广了导爆索起爆系统，1973 年瑞典诺贝尔公司研制的导爆管起爆系统进一步增加了起爆的安全性。

爆破所涉及的范围是非常广泛的，爆破方法的分类也因视角和目的的不同而多样，常见的分类方法如下。

#### 1. 按药包形状分类

（1）集中药包。从理论上讲，这种药包的形状应是球形，实际工程中将药包的形状接近球形和立方体的称为集中药包，包括药包的长度不超过直径（短边）4 倍的柱状药包属于集中药包。集中药包的爆炸应力波以球面波向外传播。

（2）延长药包。也称为柱状药包或条形药包，理论上的延长药包的长度应当远大于药包的直径，爆炸应力波以柱面波的形式向外传播。实际工程中有两种定义方法：定义一是从药包的几何形状和爆炸波传播特性与集中药包截然不同的特点来定义，以药包的长度与直径（或等效直径）的比值为判据，认为当药包长径比 $\geq 8$ 时即为延长药包；定义二从药包在岩土内爆破所产生的漏斗形状特征和爆破作用特征定义，以药包的长度与最小抵抗线的比值为判据，认为长抗比大于 2~2.5 时为延长（条形）药包。

（3）平面药包。理论或真实的平面药包是药包呈平板状，爆轰波应看作是平面波，岩土爆破中的平面药包应在岩体内平行与自由面布置，且药包的边长与最小抵抗线之比满足一定的要求。实际工程中的平面药包是以等效作用的集中或条形药包按一

定极限间距布成一个装药平面，起爆后，布药平面中的每个药室产生的球形或柱形气体腔相互作用首先贯通而沿布药平面形成一个似平面的整体气体腔，实现平面平行抛掷。

## 2. 按装药方式分类

(1) 硐室爆破。将大量炸药集中装填于按设计开挖的药室中，一次起爆完成大量的土石方爆破方法。

(2) 炮孔爆破。将炸药装填于钻孔中进行破岩的爆破方法，是工程中应用最广的爆破方法。

(3) 裸露爆破。直接将炸药敷设在被爆破物体表面上（有时加简单覆盖）起爆，达到破碎目的的爆破方法。

(4) 形状药包爆破。将炸药做成特定形状的药包，用以达到某种特定的爆破作用的爆破方法。

## 3. 按爆破作业性质分类

(1) 露天爆破。包括硐室爆破、深孔台阶爆破、浅孔爆破、石方爆破、沟槽爆破等。

(2) 地下爆破。包括井巷掘进爆破、隧道掘进爆破、地下洞室开挖爆破、地下采矿爆破等。

(3) 水下爆破。包括水下炸礁爆破、岩塞爆破、爆炸软基处理爆破、爆夯等。

(4) 拆除爆破。包括建筑物拆除爆破、构筑物拆除爆破、水压爆破等。

(5) 特种爆破。包括爆炸加工、爆炸焊接、爆炸合成等。

此外，工程应用中，常用的爆破作业还可按爆破技术分类，如松动爆破、抛掷爆破、定向抛掷爆破、预裂和光面爆破、毫秒延迟爆破、控制爆破、聚能爆破等。

### 1.3.2 爆破作业的特点

#### 1. 爆破作业的审批许可

爆破作业是一种高风险的涉及爆炸物品的特种行业，《民用爆炸物品安全管理条例》规定：国家对民用爆炸物品的生产、销售、购买、运输和爆破作业实行许可证制度。炸药和起爆器材的生产、储存、购买、运输、使用都必须遵守中华人民共和国《民用爆炸物品安全管理条例》和《爆破安全规程》的有关规定，爆破作业和爆破器材使用应当得到审批许可。

#### 2. 爆破工程分级

《爆破安全规程》（GB 6722—2003）规定，对于拆除爆破和硐室爆破、大药量深孔爆破（露天、地下、水下）、复杂环境深孔爆破、城镇浅孔爆破等都实行分级管理。

根据《爆破安全规程》（GB 6722—2003）规定，爆破工程分级见表 1-1。

表 1-1 爆破工程分级

爆破工程类别	爆破工程按药量 $Q$ (t) 与环境分级			
	A	B	C	D
硐室爆破*	$1000 \leq Q < 3000$	$300 \leq Q < 1000$	$50 \leq Q < 300$	$0.2 \leq Q < 50$
露天深孔爆破	—	$Q \geq 200$	$100 \leq Q < 200$	$50 \leq Q < 100$
地下深孔爆破	—	$Q \geq 100$	$50 \leq Q < 100$	$20 \leq Q < 50$
水下地下深孔爆破	$Q \geq 50$	$20 \leq Q < 50$	$5 \leq Q < 20$	$0.5 \leq Q < 5$
复杂环境深孔爆破	$Q \geq 50$	$15 \leq Q < 50$	$5 \leq Q < 15$	$1 \leq Q < 5$
拆除爆破	$Q \geq 0.5$	$0.2 \leq Q < 0.5$	$Q < 0.2$	—
城镇浅孔爆破	—	环境十分复杂	环境复杂	环境不复杂

说明：\* 一次用药量大于 3000t 的硐室爆破应由业务主管部门组织专家论证其必要性，其等级按照 A 级管理。  
装药量小于 200kg 的小硐室爆破归入蛇穴爆破。

爆破作业环境包括三种情况：环境十分复杂指爆破可能危及国家一、二级文物，极重要设施，极精密贵重仪器及重要建（构）筑物等保护对象的安全；环境复杂指爆破可能危及国家三级文物、省级文物、居民楼、办公楼、厂房等保护对象的安全；环境不复杂指爆破只可能危及个别房屋、设施等保护对象的安全。

《爆破安全规程》规定，拆除爆破的分级还与建筑物的高度有关，拆除的楼房超过 10 层，厂房高度超过 30m，烟囱高度超过 80m，塔高度超过 50m，属于 A 级拆除爆破。

### 3. 爆破作业单位分级

按照《爆破安全规程》（GB 6722—2003）规定爆破作业单位分 A 级、B 级、C 级和 D 级四级，爆破作业单位应当按照其资质等级承接爆破作业项目，爆破作业人员应当按照其资格等级从事爆破作业。

爆破作业单位实施爆破作业项目前，应按规定办理审批手续，批准后方可实施爆破作业。

### 4. 爆破作业人员

爆破作业人员指从事爆破作业的爆破工程技术人员、爆破员、安全员和保管员；管理人员指爆破技术负责人，爆破段（班）长、爆破器材库主任。

爆破工程技术人员按高级、中级、初级三个级别实行分级管理。

## 1.3.3 爆破工程作业流程

爆破工程的作业程序可以分为以下三个阶段。

### 1. 工程准备及爆破设计阶段

工程准备及爆破设计阶段包括工程资料的收集、爆破方案的确定、爆破技术设计、工程爆破项目和设计的审查与报批，同时着手工程的施工组织设计和施工准备。

### 2. 施工阶段

施工阶段指按施工组织设计制订的施工方法、施工顺序和施工进度以及安全保障体

系、质量检查体系、设计反馈体系精心施工的阶段。如钻孔爆破中的布孔、钻孔，硐室爆破中的导洞和药室开挖，拆除爆破中的预处理、钻孔和防护阶段。

### 3. 爆破实施阶段

爆破实施阶段，即施爆阶段，包括施爆指挥组织系统的组成、装药和填塞、爆破网路连接、防护、警戒、起爆、爆后安全检查、事故处理以及爆破后的总结等。

一般爆破的作业流程见图 1-1。

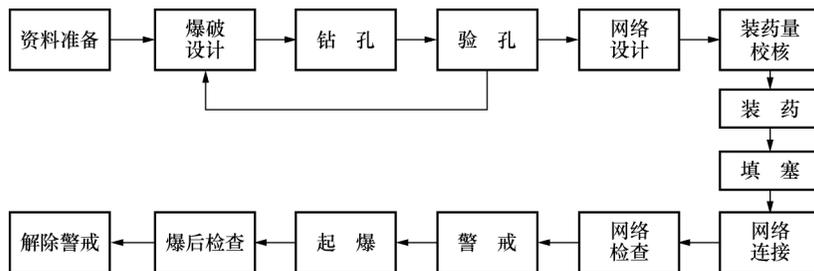


图 1-1 爆破作业流程图

### 思考题

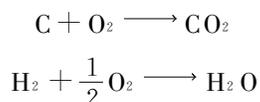
1. 什么是爆炸?
2. 炸药爆炸三要素是什么?
3. 炸药化学反应的四种基本形式是什么?
4. 按照不同的爆破作业性质，爆破方法包含哪些?
5. 为何进行爆破作业的分级制度?
6. 爆破工程作业流程有哪些?

## 第 2 章 炸药理论

### 2.1 炸药的氧平衡

#### 2.1.1 氧平衡的概念

组成炸药主要元素有 C、H、N、O 四种，其中 C、H 是可燃元素，O 是助燃元素。炸药爆炸发生的化学反应是氧化反应，且氧元素由炸药本身提供。理想的氧化反应是放热量最大、生成产物最稳定的氧化反应。发生爆炸反应时，可燃元素 C、H 的完全氧化是按式进行的



若炸药内含有足够的氧，爆炸反应生成的产物为： $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和多余的游离氧。若氧量不足，在生成产物中，除  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  外，还有  $\text{CO}$ 、C、 $\text{H}_2$  和  $\text{N}_x\text{O}_y$ （氮氧化物）。

炸药中氧元素的含量直接影响到爆炸反应的生成物，也影响到爆炸反应释放能量的多少。为了表示氧含量与可燃元素含量的相对关系，引用氧平衡的概念。

炸药内含氧量与可燃元素充分氧化所需氧量之间的关系称为氧平衡。氧平衡用氧平衡值或氧系数表示。

每克炸药中保证可燃元素充分氧化时多余或不足的氧量，称为氧平衡值，单位为 g/g，或用百分数表示。

炸药中所含的氧量与完全氧化可燃元素所需氧量的百分比，称为氧系数。

#### 2.1.2 氧平衡的计算

单质炸药和多数混合炸药主要包含 C、H、N、O 四种元素，可以写成通式  $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d$ 。单质炸药按 1mol 写出，其氧平衡值计算

$$O_B = \frac{d - \left[ 2a + \frac{b}{2} \right]}{M} \times 16 (\text{g/g}) \quad (2-1)$$

或

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

式中， $O_B$ ——炸药的氧平衡值；

16——氧的原子量；

$M$ ——炸药的摩尔质量。

混合炸药的通式按 1kg 写出, 其氧平衡的计算式为

$$O_B = \frac{d - \left[ 2a + \frac{b}{2} \right]}{1000} \times 16 \quad (2-3)$$

$$O_B = \frac{d - \left[ 2a + \frac{b}{2} \right]}{1000} \times 16 \times 100\% \quad (2-4)$$

混合炸药的氧平衡也可为按炸药中各组分的重量百分比计算

$$O_B = \sum m_i O_{b_i} \quad (2-5)$$

式中,  $m_i$ ——混合炸药中各组分重量百分比;

$O_{b_i}$ ——混合炸药各组分的氧平衡值。

对应通式  $C_a H_b N_c O_d$ , 炸药的氧系数  $O_A$  计算公式为

$$O_A = \frac{d}{\left[ 2a + \frac{b}{2} \right]} \times 100\% \quad (2-6)$$

氧平衡与氧系数之间的关系

$$O_B = \frac{16 d (1 - 1/O_A)}{M_r} \quad (2-7)$$

一些炸药和常用组分的氧平衡见附表 1。

例如, 单质炸药梯恩梯, 即三硝基甲苯, 化学式  $C_6 H_2 (NO_2)_3 CH_3$ , 通式是  $C_7 H_5 N_3 O_6$ , 摩尔质量 227 g/mol, 则氧平衡值按式 (2-2) 计算为

$$O_B = \frac{6 - \left[ 2 \times 7 + \frac{5}{2} \right]}{227} \times 16 = -0.74 (\text{g/g})$$

### 2.1.3 含有其他元素时氧平衡的计算原则

为了提高炸药的性能, 混合炸药除含主要元素 C、H、N、O 外, 还含有 Al、S、Fe、Cl 等元素, 计算氧平衡应遵循下列原则:

(1) 若含 Al、S、Fe 等元素, 应考虑生成这些元素的氧化物, 即



(2) 若含有 Cl 元素, 将它视为氧化性元素, 生成氯化氢和金属氯化物等产物。

### 2.1.4 氧平衡的分类

根据氧平衡值的大小, 可将氧平衡分为正氧平衡、负氧平衡和零氧平衡。

(1) 当  $d - \left[ 2a + \frac{b}{2} \right] > 0$  时,  $O_B > 0$ ,  $O_A > 100\%$ , 炸药中的氧完全氧化可燃元素后还有剩余, 这种情况称为正氧平衡, 这类炸药称为正氧平衡炸药。

(2) 当  $d - \left[ 2a + \frac{b}{2} \right] < 0$  时,  $O_B < 0$ ,  $O_A < 100\%$ , 炸药中的氧不足以完全氧化可燃元素, 这种情况称为负氧平衡, 这类炸药称为负氧平衡炸药。

(3) 当  $d - \left[ 2a + \frac{b}{2} \right] = 0$  时,  $O_B = 0$ ,  $O_A = 100\%$ , 炸药中的氧正好能完全氧化可燃

元素，这种情况称为零氧平衡，这类炸药称为零氧平衡炸药。

正氧平衡炸药的爆炸产物中会出现 NO、NO<sub>2</sub> 等气体，虽然可燃元素能得到充分氧化，放热量大，但是多余的氧与氮反应生成氮氧化物是吸热反应，反而会降低爆炸反应的放热量，影响炸药威力。而且氮的氧化物有强烈的毒性，并能促使煤矿瓦斯和煤尘的燃烧、爆炸，不适于在井下使用。

负氧平衡炸药不能完全氧化可燃元素，爆炸产物中含有可燃性 CO 等有毒气体，甚至出现固体碳。由于氧化反应不充分，不能放出最大热量。

零氧平衡炸药由于没有多余的氧也不缺氧，可燃元素能充分氧化，所以既能放出最大热量，又不产生毒气。

所以，氧平衡对炸药的爆炸性能，如放热量、爆生气体组成和体积、有毒气体含量、气体温度、二次火焰以及做功效率等有着多方面的影响。

## 2.2 爆炸反应方程

### 2.2.1 爆炸反应方程的近似写法

爆炸反应方程反映了爆炸产物的成分和含量，是炸药爆轰参数计算的基础，也是分析爆炸产物毒性的重要依据。准确建立爆炸反应方程是比较困难和复杂的，这是因为：

(1) 爆炸瞬间处于高温下的产物组分与冷却后用化学分析测定的爆炸产物组分不同，期间可能发生大量的可逆二次反应。

(2) 爆炸产物的组分不仅决定于炸药的组分和配比，而且受加工工艺、炸药质量、爆炸条件等因素的影响。

(3) 爆炸产生的压力和温度影响二次可逆反应化学平衡的移动，从而影响产物的组分。

(4) 起爆条件不同，也会影响产物组分。

一般情况下可以根据理论分析和经验方法写出近似的炸药爆炸反应方程。理论上根据化学平衡和质量平衡原理进行计算，经验方法中 Brinkley 和 Wilson 法的“放出最大热量原则”最为普遍，该法适用于确定爆炸产物的初始组分，下面作简要介绍。

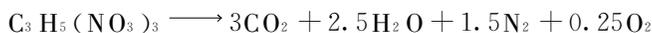
首先写出炸药的通式 C<sub>a</sub>H<sub>b</sub>N<sub>c</sub>O<sub>d</sub>，按氧平衡将炸药分为三类。

第一类炸药。符合  $d \geq 2a + \frac{b}{2}$  的炸药，即正氧平衡和零氧平衡炸药。这类炸药的爆炸反应生成产物应为充分氧化产物，建立爆炸反应方程的原则是：H 全部氧化成 H<sub>2</sub>O，C 全部氧化成 CO<sub>2</sub>，N 与多余的 O 游离。

反应方程为



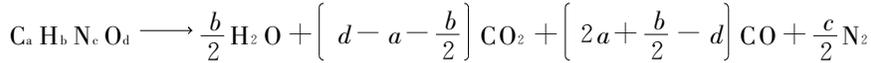
例如，硝化甘油爆炸的反应方程可写成



第二类炸药。符合  $a + \frac{b}{2} \leq d < 2a + \frac{b}{2}$  的负氧平衡炸药。这类炸药含氧量不足以

使可燃元素充分氧化，但生成产物均为气体，无固体碳。建立爆炸反应方程的原则是：H全部氧化成 $H_2O$ ，C先全部氧化成 $CO$ ，然后多余的O将部分 $CO$ 氧化成 $CO_2$ ，N游离。

反应方程为



例如，泰安爆炸的反应方程可写成



反应完成后，可燃元素C氧化为 $CO$ 和 $CO_2$ 两种产物。

第三类炸药：符合 $d < a + \frac{b}{2}$ 的负氧平衡炸药。这类炸药由于严重缺氧，爆炸产物中有可能出现固体碳。爆炸反应方程的建立原则是：H全部氧化成 $H_2O$ ，剩余的O将部分C氧化成 $CO$ ，多余的C和N游离。

反应方程为



例如，梯恩梯 $C_6 H_2 (NO_2)_3 CH_3$ 的爆炸产物为



### 2.2.2 有害气体

在炸药爆炸生成产物中， $CO$ 和氮氧化物（ $NO$ 、 $NO_2$ 、 $N_2O_3$ 、 $N_2O_4$ ）等都属有毒气体，或称有害气体。炸药含硫或含氯酸盐时，还能生成 $H_2S$ 、 $SO_2$ 、 $HCl$ 、 $Cl_2$ 等有毒气体。

$H_2S$ 和 $SO_2$ 等有害气体进入人体呼吸系统后能引起中毒， $CO$ 和氮氧化物不仅危害人体健康，还能对工作环境造成不利影响。在煤矿井下， $CO$ 能够引起二次火焰，而氮氧化物则对瓦斯起催爆作用。

产生有害气体的原因主要有以下几个方面：

(1) 炸药的组成和氧平衡。负氧平衡炸药生成 $CO$ 较多，正氧平衡炸药容易产生氮的氧化物，尤其是硝酸铵类炸药表现得较为明显。接近零氧平衡的炸药产生有害气体较少。

(2) 爆炸反应的不完全性。即使是零氧平衡炸药，如果反应不完全，也会产生较多的有害气体。

(3) 装药外壳的影响。采用纸、石蜡防潮物、可燃性塑料等作为装药外壳时，部分外壳材料会与爆轰产物发生作用而生成 $CO$ ，装药外壳实际上改变了原有炸药的氧平衡。

(4) 爆轰产物与被爆介质的相互作用。例如，煤可以还原 $CO_2$ 为 $CO$ ，爆破含硫矿石时，可生成 $H_2S$ 、 $SO_2$ 等有害气体。

## 2.3 炸药的热化学参数

炸药的热化学参数是衡量炸药爆炸做功能力和估计炸药爆炸破坏作用的重要指标，

包括爆容、爆热、爆温和爆压。

### 2.3.1 爆容

单位质量炸药爆炸生成气体产物在标准状态下的体积称为爆容。通常以 1kg 为单位计算，单位为 L/kg。

炸药爆炸反应方程式确定后，按阿佛加德罗定律可计算出炸药的爆容。

若炸药的通式  $C_a H_b N_c O_d$  是按 1mol 写出的，其爆容计算式为

$$V_0 = \frac{22.4 \sum n_i}{M} \times 1000 \quad (2-8)$$

式中， $\sum n_i$ ——气体产物的总摩尔数；

$M$ ——炸药的摩尔质量。

若炸药的通式按 1kg 写出，则爆容就等于反应方程中各种气体产物体积的和

$$V_0 = 22.4 \sum n_i \quad (2-9)$$

如硝酸铵的摩尔量 80，属于第一类炸药，爆炸反应方程为



爆炸生成气体产物的总摩尔数为

$$\sum n_i = 2 + 0.5 + 1.0 = 3.5$$

按式 (2-8) 计算，爆容为

$$V_0 = \frac{22.4 \times 3.5}{80} \times 1000 = 980(\text{L/kg})$$

由于气体产物是爆炸所释放热量转变为机械功的介质，故爆容是爆炸做功能力的一个标志。爆容越大，炸药做功能力越强。表 2-1 给出了部分炸药的爆容值。

表 2-1 部分炸药的爆容值

炸药名称	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	爆容/(L/kg)
梯恩梯	1.5	740
黑索金	1.5	890
硝化甘油	1.6	690
硝酸铵	—	980
铵梯炸药 (80:20)	1.3	890
黑火药	—	280

### 2.3.2 爆热

单位质量炸药爆炸时所释放出的热量，称为爆热。通常以 1kg 或 1mol 炸药所放出的热量来表示，其单位为 J/kg 或 J/mol。

爆热是一个很重要的爆炸性能参数，它表示炸药对外做功的能力。炸药爆热越大，炸药对外做功的能力就越强。由于炸药的爆炸反应极为迅速，炸药的爆轰是在定容绝热压缩的条件下进行的，故称定容爆热  $Q_v$ ，而且炸药的定容热效应更能直接地反应炸药的能量性质。

炸药的爆热可以由实测确定，也可通过理论计算获得。表 2-2 列出了一些炸药的爆热实测值。

表 2-2 一些炸药的爆热

炸药名称	装药密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	爆热 / (kJ/kg)
梯恩梯	1.5	4222
黑索金	1.5	5392
泰安	1.65	5685
特屈儿	1.55	4556
雷汞	3.77	1714
硝化甘油	1.6	6186
硝酸铵	—	1438
铵梯炸药 (80 : 20)	1.3	4138
铵梯炸药 (40 : 60)	1.55	4180

用理论方法计算炸药的爆热时要知道炸药的化学组成、爆炸反应方程式和必需的热化学数据，然后采用盖斯定律计算。

**盖斯定律：**化学反应的热效应只取决于反应的初态和终态，与反应进行的途径无关。由同一物质经不同途径得到同一产物时，则在这些途径中放出和吸收热量的总和是相等的。

利用盖斯定律计算炸药的爆热，如图 2-1 的盖斯三角所示。图中的 1、2、3 分别表示在标准状态下的元素、炸药和爆轰产物。从状态 1 到状态 3 有两条途径，一种途径首先由元素得到炸药，同时放出（或吸收）热量  $Q_{1-2}$ ，然后炸药爆炸并放出热量  $Q_{2-3}$ （爆热）；另一种途径是由元素直接生成与爆炸反应生成产物的，同时放出热量  $Q_{1-3}$ （爆炸产物的生成热）。

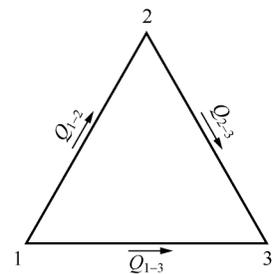


图 2-1 盖斯三角  
1. 元素；2. 炸药；3. 爆轰产物

根据盖斯定律，爆热等于爆炸产物的生成热减去炸药本身的生成热，即

$$Q_{2-3} = Q_{1-3} - Q_{1-2} \quad (2-10)$$

式中， $Q_{2-3}$ ——炸药的爆热；

$Q_{1-2}$ ——炸药的生成热；

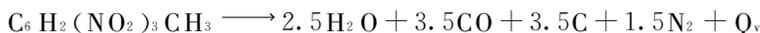
$Q_{1-3}$ ——爆轰产物的生成热。

生成热是指由元素生成 1kg 或 1mol 化合物放出或吸收的热量，生成热有两种表示方法，即定容生成热和定压生成热。反应过程在定容条件下的生成热称为定容生成热，反应在恒压条件下产生的生成热称为定压生成热，部分物质的生成热，如附表 2 和附表 3 所示。炸药的爆热也相应分为定容爆热  $Q_v$  和定压爆热  $Q_p$ 。

对于凝聚体炸药，定压爆热  $Q_p$  换算成定容爆热  $Q_v$  的计算式为

$$Q_v = Q_p + nRT \quad (2-11)$$

如求梯恩梯的爆热，先确定近似爆炸反应式



产物生成热为

$$\text{H}_2\text{O} \quad 2.5 \times 240.7 = 601.75(\text{kJ/mol})$$

$$\text{CO} \quad 3.5 \times 113.76 = 398.16(\text{kJ/mol})$$

爆轰产物总生成热为

$$Q_{1-3} = 601.75 + 398.16 = 999.91(\text{kJ/mol})$$

查附表 2 得梯恩梯的生成热为  $Q_{1-2} = 56.52(\text{kJ/mol})$ ，所以梯恩梯的爆热为

$$Q_v = 999.91 - 56.52 = 943.39(\text{kJ/mol})$$

$$= 1000 \times 943.39 / 227 = 4215(\text{kJ/kg})$$

炸药的爆热受以下因素影响：

- (1) 炸药的氧平衡。工业用混合炸药应尽量配成零氧平衡炸药，其爆热最高。
- (2) 装药密度。随着炸药密度增大，爆轰压力也会增大，这使爆炸瞬间的二次可逆反应向着减小体积和增大放热的方向进行，这对负氧平衡炸药的影响较为明显。二次反应包括



装药密度增加使爆轰压力增高后，上述两个二次反应的平衡向右侧移动，而使气体产物体积减小，爆热增加。但对于零氧平衡和正氧平衡炸药，其爆轰产物  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的解离速度较小，因而对爆热影响不明显。

(3) 附加物。在炸药中加入铝粉、镁粉等金属粉末时，反应生成金属氧化物和氮化物的过程都是剧烈的放热过程，从而增加爆热。

(4) 装药外壳。增加外壳强度或重量，能阻止气体产物的膨胀，提高爆压，从而提高爆热。例如，压装在黄铜壳中的梯恩梯爆轰所放出的热量比装在薄玻璃壳中爆轰时高 25%。

(5) 化学反应的完全程度。炸药反应越完全，放热越充分，爆热越高。

### 2.3.3 爆温

炸药爆炸所放出的热量将爆炸产物加热到的最高温度，称为爆温。单位为摄氏度或热力学温度 K。

由于爆炸过程迅速，爆温高而且随时间变化极快，加上爆炸的破坏性，爆温的实验测定难度极大。炸药的爆温可用光谱法测定，方法是测定爆炸瞬间产物的色温，利用光谱图研究光谱中能量的分配，通过比较爆炸产物的光谱与绝对黑体光谱中能量分配关系而得到爆温数据。表 2-3 为几种炸药的爆温实测值。

表 2-3 几种炸药的实测爆温

炸药名称	硝化甘油	黑索金	泰安	特屈儿	梯恩梯
密度 / ( $\text{g/cm}^3$ )	1.60	1.70	1.77	—	—
爆温 / K	4000	3700	4200	3700	3010

①  $1\text{cal} = 4.1868\text{J}$

鉴于爆温实验测定的困难，目前主要是从理论上计算炸药的爆温，常用卡斯特法，即利用爆热和爆炸产物的平均热容来计算爆温。为使计算简化，采用以下假定：

- (1) 爆炸过程视为定容、绝热过程，爆炸反应放出的能量全部用来加热爆轰产物。
- (2) 爆轰产物的热容只是温度的函数，而与爆炸时所处的压力等其他条件无关。

根据上述假定，将炸药爆热和爆温的关系表示为

$$Q_v = \bar{C}_v T \quad (2-12)$$

式中， $Q_v$ ——爆热；

$\bar{C}_v$ ——所有爆轰产物的平均热容；

$T$ ——爆温。

近似计算认为所有爆炸产物平均热容与温度之间为线性关系，即

$$\bar{C}_v = \sum n_i (a_i + b_i T) = \sum n_i a_i + \sum n_i b_i T \quad (2-13)$$

式中， $\bar{C}_v$ ——爆轰产物的平均热容；

$a_i$ 、 $b_i$ ——第  $i$  种爆轰产物的系数，见表 2-4；

$n_i$ ——第  $i$  种爆轰产物的摩尔数。

令

$$A = \sum n_i a_i, B = \sum n_i b_i$$

则有

$$\bar{C}_v = A + BT \quad (2-14)$$

由式 (2-12) 得到

$$Q_v = (A + BT) T \quad (2-15)$$

所以求解方程 (2-13)，得到爆温的计算公式为

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4BQ_v}}{2B} \quad (2-16)$$

表 2-4 爆轰产物的  $a_i$ 、 $b_i$  值

爆轰产物	$a_i$	$b_i \times 10^{-3}$	爆轰产物	$a_i$	$b_i \times 10^{-3}$
双原子气体	20.1	1.88	水蒸气	16.7	9.0
三原子气体	41.0	2.43	$Al_2O_3$	99.9	28.18
四原子气体	41.8	1.88	NaCl	118.5	0.0
五原子气体	50.2	1.88	C	25.1	0.0

爆温是炸药的一个重要参数，它取决于爆热和爆炸产物组成。提高爆温的途径有：

- (1) 提高产物的生成热。
- (2) 降低炸药的生成热。
- (3) 降低爆炸产物的热容量。

在某些情况下希望炸药的爆温高些，以获得较大的威力，这时可以通过调整氧平衡，使爆炸产生大量的  $CO_2$  和  $H_2O$  等生成热较大的产物，或加入某些高热值的金属粉末等。但是，在提高热量的同时必须考虑减小产物的热容量。

降低爆温的途径和提高爆温的途径正好相反，可以在炸药中加入附加物来改变氧与

可燃元素的比例，使之产生不完全的氧化产物从而减少爆炸产物的生成热。或者加入不参与反应的附加物，以增加产物的总热容量。在煤矿许用炸药中，常用加入消焰剂（如氯化钠）的办法来降低爆温，以防过高爆温引起瓦斯、煤尘爆炸。

### 2.3.4 爆压

爆炸产物在爆炸反应完成瞬间所达到的压力称为爆压，单位为 MPa。它实质上是假定爆炸反应为绝热等容过程，爆炸产物在炸药原体积内达到热和化学平衡后的流体静压值。

爆压一般通过阿贝尔状态方程计算，即

$$p = \frac{nRT}{V - \alpha} = \frac{n^0}{1 - \alpha^0} RT \quad (2-17)$$

式中， $\alpha$ ——气体分子的余容，是炸药密度的函数；

$\rho$ ——炸药密度；

$V$ ——比容， $V=1/\rho$ ；

$T$ ——爆温。

爆压也可通过测压弹实验测定。

## 2.4 炸药的起爆与感度

### 2.4.1 起爆能

炸药是一种相对稳定的物质，在没有受到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爆炸。

起爆——炸药受到外界作用发生爆炸的过程称为起爆。

起爆能——引爆炸药所需要的能量，称为起爆能。

感度——炸药在外界作用下发生爆炸的难易程度称为感度。

感度是衡量炸药稳定性的重要标志。引爆需要的能量越小，则表明炸药越敏感，反之则较为钝感。根据化学动力学观点，在通常情况下，炸药分子的平均能量不足以引起炸药的爆炸反应，只有炸药分子的能量提高到使分子进一步活化时，才能发生爆炸反应。使炸药分子从稳定状态变成活化分子所需要的能量，称为炸药的活化能。

起爆能和活化能是两个不同的概念。后者取决于炸药的分子结构与化学性质，而前者不仅取决于炸药的化学性质，还与炸药的物理性质、起爆能的形式有关。

通常，引起炸药发生爆炸的起爆能有以下形式：

(1) 热能。利用加热作用使炸药起爆，如直接加热、火焰或电线灼热起爆等。

(2) 机械能。通过撞击、摩擦、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。

(3) 爆炸冲能。利用爆轰波以及冲击波的冲击作用使炸药起爆。

(4) 电能。利用静电作用、高压火花放电以及高强度电磁辐射和高能粒子辐射能等引爆炸药。

### 2.4.2 炸药的起爆机理

根据活化能理论, 化学反应只是在具有活化能量的活化分子相接触和碰撞时才发生。因此为使炸药起爆, 就必须有足够的外能使部分炸药分子变成活化分子, 活化分子的数量越多, 其能量与分子平均能量相比越大, 爆炸反应速度越快。

#### 1. 热爆炸理论

谢苗诺夫研究了爆炸性混合气体的热爆炸理论, 其后富兰卡-卡曼尼兹等人进一步研究发展了该理论, 并将它成功地应用于凝聚体炸药。

该理论的基本要点是在一定的温度、压力和其他条件下, 如果一个体系内的炸药反应放出的热量大于热传导所散失的热量, 就能使该体系发生热积聚, 从而使反应自动加速而导致爆炸。也就是说, 爆炸是系统内部温度渐增的结果。

根据这个观点, 确定炸药发生热爆炸的条件之一是放热量大于散热量, 即

$$Q_1 > Q_2 \quad (2-18)$$

式中,  $Q_1$ ——单位时间内炸药反应放出的热量;

$Q_2$ ——单位时间内炸药散失到周围环境中的热量。

热能起爆的第二个条件是炸药热分解反应放热速度必须大于环境介质的散热速度, 即

$$\frac{dQ_1}{dT} > \frac{dQ_2}{dT} \quad (2-19)$$

#### 2. 热点起爆理论

在机械作用下, 炸药发生爆炸的机理非常复杂, 目前比较公认的是热点起爆理论。热点起爆理论认为, 当炸药受到撞击、摩擦等机械能的作用时, 并非受作用的各个部分都被加热到相同的温度, 而只是其中的某一部分或几个极小的部分首先被加热到炸药的爆发温度, 促使局部炸药首先起爆, 然后迅速地传播至全部。这种温度很高的微小区域, 通常被称为热点, 也称灼热核。对于单质炸药或者含单质炸药的混合药来说, 其热点通常在晶体的棱角处形成。而对于含水炸药(乳化炸药、浆状炸药等)来说, 一般是在微小气泡处形成热点。下面阐述了这两种形成热点的原因的不同。

(1) 绝热压缩炸药内所含的微小气泡, 形成热点。当炸药内部含有微小气泡时, 在机械能的作用下, 被绝热压缩, 此时机械能转变为热能, 使温度急剧上升, 在气泡周围形成热点, 并引起周围反应物质的剧烈燃烧或爆炸。

(2) 炸药受机械作用, 颗粒间产生摩擦, 形成热点。在机械能作用下, 炸药质点之间或炸药与掺合物之间发生相对运动而产生的相互摩擦, 也可使炸药某些微小区域首先达到爆炸温度, 形成热点。

此外, 由于液态炸药(塑性炸药或低熔点炸药)高速黏性流动, 也可形成热点。

研究表明, 热点产生以后, 炸药必须具备一定的条件才能爆炸。在这里热点的大小、温度 and 作用时间是最为重要的。研究表明, 热点必须满足下列条件:

(1) 热点的尺寸应尽可能地细小, 直径一般为  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  cm。

- (2) 热点的温度应为  $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 热点的作用时间在  $10^{-7}\text{s}$  以上。

研究表明，从热点的形成到炸药的稳定爆轰要经历以下几个阶段：

- (1) 热点的形成阶段。
- (2) 热点向周围速燃扩展阶段。
- (3) 由速燃转变为低速爆轰阶段。
- (4) 稳定爆轰阶段。

### 3. 爆炸冲击能起爆理论

均相炸药（即不含气泡、杂质的液体或晶体炸药）和非均相炸药的爆炸冲击能起爆机理是不同的。

爆炸产生的冲击波进入均相炸药（如四硝基甲烷）后，经过一定的延迟，便开始在其表面形成爆轰波。这个爆轰波是在强冲击波通过后在已被冲击压缩的炸药中产生的，此时爆轰波的传播速度比正常的稳定爆速大得多。虽然它开始是跟随于强冲击波的后面，但经一定的距离后，它会赶上冲击波阵面，其爆速突然降低到略高于稳定的值，往后慢慢地达到稳定爆速。一般地说，均相炸药的爆炸冲击能起爆，取决于临界起爆压力值（ $P_k$ ）。不同炸药的临界起爆压力值是不相同的。

非均相炸药的爆炸冲击能起爆反应是从局部“热点”处展开的，而不像均相炸药反应那样能量均匀分配给整个起爆面上，这样非均相炸药所需的临界起爆压力  $P_k$  值要比均相炸药小。实际上，非均相炸药的冲击能起爆是可以热点理论进行解释的。

### 2.4.3 热感度

炸药在热能作用下发生爆炸的难易程度称为炸药热感度，通常以爆发点和火焰感度等来表示。

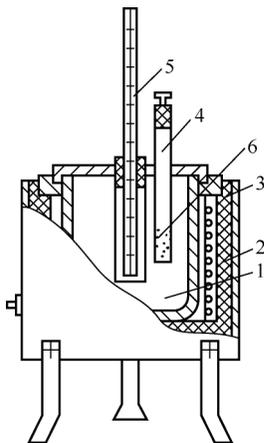


图 2-2 爆发点测定器

- 1. 合金浴锅；2. 电阻丝；3. 隔热层；
- 4. 铜管；5. 温度计；6. 炸药

#### 1. 炸药的爆发点

炸药的爆发点系指炸药分解自行加速开始时的环境温度。从炸药的分解开始自行加速到爆炸所经历的时间称为爆发延滞期。

通常采用爆发点测定器来测定炸药的爆发点。测定器的主要结构是低熔点伍德合金浴锅，如图 2-2 所示。在锅内装上温度计（带有保护罩），浴锅用电阻丝进行加热，并在夹套间装有隔热层以防止热损失。

测定时，称取一定量（炸药取  $0.05\text{g}$ ，起爆药取  $0.01\text{g}$ ）的试样放入铜管中，并轻轻塞上小铜塞，待低熔点合金浴锅加热到将近爆发点时，将已准备好的铜管插入合金浴锅中（深度要超过

管体 2/3), 以秒表计时, 如在此温度下不爆炸, 或超过 5min 才爆炸, 则需升高温度; 如果早于 5min 爆炸, 则需降低温度。如此反复几次, 即可测出被试炸药的爆发点。表 2-5 列出了一些炸药的爆发点。

表 2-5 几种炸药的爆发点

炸药名称	爆发点/℃	炸药名称	爆发点/℃
EL 系列乳化炸药	330	雷汞	175~180
2# 岩石铵梯炸药	186~230	氯化铅	300~340
3# 露天铵梯炸药	171~179	黑索金	230
2# 煤矿铵梯炸药	180~188	特屈儿	195~200
3# 煤矿铵梯炸药	184~189	硝化甘油	200
硝酸铵	300	梯恩梯	290~295
黑火药	290~310	二硝基重氮酚	150~151

## 2. 火焰感度

炸药在明火(火焰、火星)作用下, 发生爆炸的难易程度称为炸药的火焰感度。实践表明, 在非密闭状态下, 黑火药与猛炸药用火焰点燃时通常只能发生不同程度的燃烧变化, 而起爆药却往往表现为爆炸。

图 2-3 所示的装置一般用来测量炸药的火焰感度。其操作步骤是: 准确称取 0.05g 试样, 装入火帽壳内, 变更插导火索的上下盘之间的距离, 以测定 100% 发火的最大距离(上限距离)和 100% 不发火的最小距离(下限距离)。一般以六次平行实验结果为准。由于导火索的喷火强度随其药芯的粒度、密度等不同而变化, 所以实验结果通常只能作为相对比较之用。

由上述可知, 一个炸药的上限距离越大, 其火焰感度愈大; 下限距离愈小, 其火焰感度愈小。一般地说, 上限距离可用来比较起爆药发火的难易程度, 下限距离则往往作为判定炸药对火焰安全性的依据。

### 2.4.4 机械感度

机械感度是指炸药在机械作用下发生爆炸的难易程度, 是炸药最重要的感度指标之一, 包括撞击感度和摩擦感度。

#### 1. 撞击感度

炸药撞击感度的试验常用立式落锤仪(图 2-4)和弧形落锤仪(图 2-5), 测定时将炸药试样置于撞击器内上下两击柱之间, 常用的表示方法有三种:

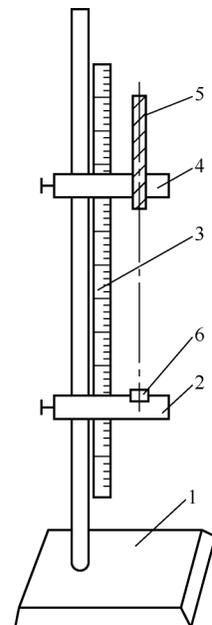


图 2-3 火焰感度测定装置

1. 铁座; 2. 下盘; 3. 表尺;
4. 上盘; 5. 导火索;
6. 火帽壳

(1) 爆炸百分数。落高 25cm，锤重 10kg，撞击 25~50 次，求出其爆炸百分率。当爆炸百分率为 100% 时，改用 5kg 或 2kg 重锤重新试验。

(2) 上下限法。上限：百分之百爆炸的最低落高；下限：百分之百不爆炸的最高落高。

(3) 50% 爆炸特性高度。即找出 50% 爆炸的那一点的高度来表示。

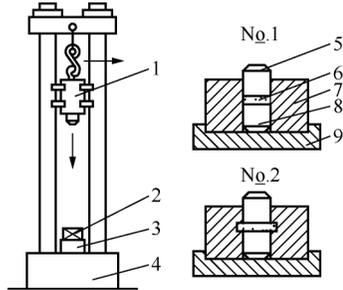


图 2-4 立式落锤仪

1. 落锤；2. 撞击器；3. 钢砧；4. 基础；5. 上击柱；  
6. 炸药；7. 导向套；8. 下击柱；9. 底座

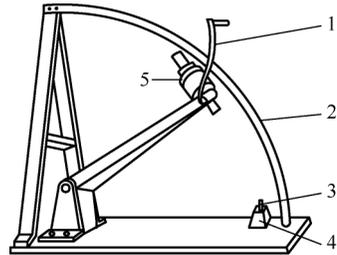


图 2-5 弧形落锤仪

1. 手柄；2. 有刻度的弧架；3. 击柱；  
4. 击柱和火帽定位器；5. 落锤

撞击感度曲线如图 2-6 所示，部分炸药和起爆药的撞击感度见表 2-6 和表 2-7。

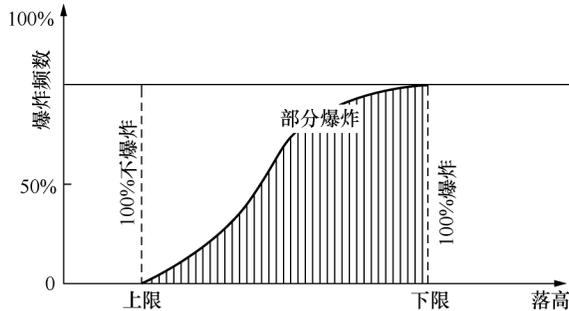


图 2-6 撞击感度曲线

表 2-6 标准条件下一些炸药的撞击感度

炸药名称	爆炸百分数/%	备注	炸药名称	爆炸百分数/%	备注
梯恩梯	4~8		岩石膨化硝酸铵炸药	0~6	
泰安	100		2号煤矿许用膨化硝酸铵炸药	0~6	
黑索金	75~80		岩石粉状乳化炸药	0~6	
特屈儿	50~60		煤矿许用粉状乳化炸药	0	含一、二、三级
苦味酸	24~32		岩石乳化炸药	0~2	
2号岩石铵梯炸药	4~40		煤矿许用乳化炸药	0	含一、二、三级

注：乳化炸药试验条件为药量 0.05g，落锤锤重 10kg，落锤高度 50cm。