

李翼祺 马素贞 著

# 爆炸力学

科学出版社

# 爆 炸 力 学

李翼祺 马素贞 著



科 学 出 版 社

1 9 9 2

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

爆炸力学除在国防工程中有重要作用外,在国民经济建设,乃至医疗中均有广泛应用。本书讨论了由炸药化学反应过程引起的爆炸现象及其规律性,阐述爆炸的一些基本理论和在工程中的应用。主要内容有:炸药与爆炸、应力波理论、介质(包括大气、水和岩土)中的爆轰理论及其效应,爆炸的地震效应以及爆破工程等。

本书可作为固体力学、爆炸力学、地下结构等专业的教师、大学生、研究生和科研人员阅读,也可作为采矿、爆破、抗爆、人防、土木、水利、道路工程抗震及国防工程等方面的工程技术人员参考。

## 爆 炸 力 学

李翼祺 马素贞 著

责任编辑 徐一帆

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1992 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1992 年 4 月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—1800 字数:434 000

ISBN 7-03-002616-0/O·490

定价:16.50 元

# 前 言

随着科学技术的发展,爆炸力学这门学科在国防工业、国民经济建设中的应用愈来愈广泛。如建筑结构、地震、人民防空、宇航工程、国防工程及医疗等方面都有着广泛的用途。当前国内缺乏爆炸力学方面的参考书和教科书可供高等学校师生、工程技术人员参考、阅读。本书可以弥补以上之不足。

本书较系统地阐述了爆炸力学基本理论及工程实际的应用,并结合长期从事与爆炸力学有关的科研、教学工作的成果,以较新、较多的工程实例、研究成果和图表阐明观点,为照顾更多的不同专业及不同程度的读者,在阐明观点前亦简介了爆炸力学的基本概念、定理及国内外发展动态。

本书曾得到下列各方面的支持帮助,在此表示衷心的感谢。

首先感谢科学出版社在经济困境中保证了本书的出版。

感谢中国科技大学周凯元教授、复旦大学王文亮教授、浙江大学刘鸿文教授、唐锦春教授和庄表中教授等为本书审稿,给予肯定和鼓励,并提出了许多宝贵的意见,为本书最后定稿起了很大作用。

感谢张礼明同志为本书描图付出了辛勤劳动。感谢李雯同志为本书稿和插图的完成付出了辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中的缺点、错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

1991年8月

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第一章 爆炸与炸药</b> .....       | 1   |
| § 1-1 什么叫爆炸.....             | 2   |
| § 1-2 爆燃、爆炸与爆震.....          | 7   |
| § 1-3 炸药爆炸的特征 .....          | 9   |
| § 1-4 炸药的分类 .....            | 16  |
| § 1-5 炸药的基本性质 .....          | 24  |
| <b>第二章 应力波理论</b> .....       | 41  |
| § 2-1 热力学基本定律 .....          | 41  |
| § 2-2 应力与应变 .....            | 52  |
| § 2-3 本构关系 .....             | 59  |
| § 2-4 应力波 .....              | 75  |
| § 2-5 固体中的应力波 .....          | 81  |
| § 2-6 弹性波的相互作用——反射和透射 .....  | 97  |
| § 2-7 弹塑性波的相互作用 .....        | 130 |
| <b>第三章 介质中的爆炸及其效应</b> .....  | 150 |
| § 3-1 量纲分析与爆炸相似律 .....       | 150 |
| § 3-2 各类爆炸问题 .....           | 162 |
| § 3-3 炸药的爆轰 .....            | 172 |
| § 3-4 爆轰参数的计算 .....          | 184 |
| § 3-5 爆轰波反应区的结构 .....        | 205 |
| § 3-6 影响炸药爆轰传播的因素 .....      | 221 |
| <b>第四章 大气中爆炸理论及其作用</b> ..... | 237 |
| § 4-1 大气中爆炸的物理现象 .....       | 237 |
| § 4-2 大气中爆炸时空气冲击波的初始参数 ..... | 251 |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| § 4-3      | 爆炸冲击波的计算公式(经验公式)    | 258        |
| § 4-4      | 空气冲击波对目标的作用         | 274        |
| § 4-5      | 对空气冲击波的防护           | 306        |
| <b>第五章</b> | <b>水中爆炸理论及其作用</b>   | <b>318</b> |
| § 5-1      | 水中爆炸的物理现象           | 318        |
| § 5-2      | 水中冲击波               | 326        |
| § 5-3      | 水中冲击波的传播            | 338        |
| § 5-4      | 水中冲击波的反射            | 347        |
| § 5-5      | 水中冲击波的作用            | 349        |
| <b>第六章</b> | <b>岩土中的爆炸理论及其作用</b> | <b>356</b> |
| § 6-1      | 岩、土的物理力学特性          | 356        |
| § 6-2      | 岩土中的爆炸特性            | 370        |
| § 6-3      | 岩土中爆炸波的参数           | 378        |
| § 6-4      | 岩土中爆炸的作用            | 417        |
| <b>第七章</b> | <b>爆炸的地震效应</b>      | <b>441</b> |
| § 7-1      | 爆炸引起的地震波            | 443        |
| § 7-2      | 爆炸的地震效应             | 459        |
| § 7-3      | 爆炸地震的震级             | 488        |
| § 7-4      | 爆破地震动的降震措施          | 507        |
| <b>第八章</b> | <b>爆破工程</b>         | <b>517</b> |
| § 8-1      | 起爆器材及起爆方法           | 517        |
| § 8-2      | 岩石爆破的机理             | 537        |
| § 8-3      | 控制爆破技术              | 546        |
| § 8-4      | 药室爆破技术              | 568        |
| § 8-5      | 定向爆破                | 577        |
| § 8-6      | 建筑物的爆破拆除技术          | 601        |

# 第一章 爆炸与炸药

爆炸力学是一门新兴的交叉科学,它包括流体力学、气体动力学基础、固体力学、物理力学和化学反应动力学等学科,它是这些学科之间的边缘学科。此外,还涉及到电磁学、电工学、电子学、电子计算机和控制论等。

爆炸力学主要研究爆炸现象发生和发展的规律,爆炸的各种效应以及力学效应的利用、控制和防护等。又因爆轰波和冲击波的理论属于力学的又一分支,叫做物理力学(或爆轰物理学)。至于强冲击波在固体介质(如土、岩石、金属)中的传播则又是一门新学科。它要考虑多种颗粒的小晶体在强冲击波作用下的行为,即研究大约  $10^{-3}$  厘米或  $10^5$  埃范围的动力学。这是涉及到上百万原子集体的运动,在国外叫“亚微观”或“准微观”的学科,用物理上的术语来说,叫做“精细力学”。爆炸力学在国民经济中,特别是在国防建设中有着重要的作用。显而易见,常规武器和核武器的研制,各种防护工程、抗爆结构的研究,工程爆破、爆炸加工及焊接等方面都要用到爆炸力学的理论。正因为如此,爆炸力学研究的进展,反过来又促进了上述各个方面的发展。

由于爆炸现象具有高温、高压和瞬时作用的特点,虽然爆炸力学的研究方法也是实验和数学分析相结合的方法,但它和一般的连续介质力学有着明显的区别:其一是在爆炸力学中,载荷和介质是耦合在一起且相互作用的,只有在爆炸力学问题最后解决时才能知道载荷的大小;其二是介质的物理数

学模式的选取也要由载荷的强度来决定，例如固体在低强度载荷作用下可以看作是弹性体，在中等强度时取流体弹塑性模式，在高强度时则可看作为流体。反之像水这样明显的流体，在低强度爆炸压力的作用下，又可看作是刚体。

## § 1-1 什么叫爆炸

爆炸是在某一个“系统”中，其物理和化学的能量急骤转化的一种过程。在这个过程中“系统”的内在势能急剧地转变为动能、机械功以及光和热的辐射（如系核爆炸，则尚有丙种射线的辐射和放射性元素的污染等）。爆炸作功是系统内部的高压、高温气体的突然膨胀，对爆炸源周围介质的作功。因此，爆炸也可以说是一种极为迅速（一般是在几个毫秒到几十个毫秒的时间之内完成）的物理或化学的能量的释放过程。经有关专家指出：一个直径为  $D$  的黄色炸药的药球、球对称爆炸所释放的能量是  $3.52 \times 10^9 \times D^3$  焦耳，其功率是  $4.72 \times 10^{10} \times D^2$  千瓦，所以要达到百亿千瓦的功率是不难的。这样大的功率可以做很多难以做到的事。爆炸可以产生极强的脉冲电流，脉冲磁场以及极高的脉冲压力，而这些都是现代科学研究所要求的。这里都有能量转化的问题，而对科学研究来说，特别要求对转化过程尽可能做到精密控制。

爆炸的一个最重要的特征是在爆炸点周围介质中引起状态的急剧突变，例如压力突变，密度、速度等状态参数也发生突变。而这种状态参数的突变，特别是压力的突变，是爆炸引起破坏的直接原因。

如上所述，爆炸是由各种不同的物理现象或化学现象所引起的。因此对引起爆炸过程的性质而论，爆炸大致可以分

为如下几类。

## 一、物理爆炸现象

我们经常可以听到由于违章操作而引起蒸汽锅炉的爆炸,造成生命、财产遭受损失的事故。这是由于锅炉里的水迅速转变为过热蒸汽,从而形成过高的压力,当建造锅炉的材料(或接缝材料)承受不了这种高压而破裂时,就会发生突然爆炸。日常生活中做饭烧菜的液化气瓶,有时也会因瓶体承受不了过大的压力而发生爆炸,这些爆炸都称为物理爆炸。又如地壳内部弹性压缩能引起的地壳运动(地震、火山爆发等),也是一种强烈的物理爆炸现象。最大的地震能量达  $10^{23}$ — $10^{25}$  尔格<sup>1)</sup>,比 100 万吨级的核爆炸还要厉害。强火花放电(闪电和雷击)或高压电流通过细金属丝所引起的爆炸现象,也是一种物理爆炸现象,但此时的能源是电能。强放电时能量在  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  秒内释放出来,使放电区达到巨大的能量密度和数万度的高温,因而导致放电区的空气压力急剧升高,并在周围形成很强的冲击波。

其他如高速物体的碰撞(陨石落地,高速火箭击中目标等)也会产生爆炸。例如 1908 年 6 月 30 日在西伯利亚通古斯地区发生了一次奇怪的大爆炸。随着一阵天崩地裂的巨响,通古斯地区方圆 90 公里的森林被彻底摧毁,在爆炸中心出现了一个直径数百米的大坑。但是这次大爆炸在科学上一直是个谜,直到 70 多年后的今天,才由美国的科学家阿蒙德森·蒙特从对南极的考察中找到了答案,解了这个科学上的通古斯之谜。他认为这是一次陨石坠毁时引起的大爆炸。又

1) 1 尔格 =  $10^{-7}$  焦耳。

如水的骤然汽化等所引起的爆炸，以及高速离子束（强激光束，相对论电子束，重离子束）作用于物质，同样能形成爆炸。所有这些爆炸都属于物理爆炸现象。

物理爆炸现象的实质是物质仅发生物态的急剧变化，而物质本身的分子组成，在爆炸前后并未改变。

## 二、化学爆炸现象

1982年10月18日法国东部城市梅茨一家麦芽厂的粮食仓库发生了大爆炸，7座巨大而坚固的立式钢筋混凝土粮仓有4座被摧毁。爆炸现场堆满了钢筋混凝土碎块，粮仓工作人员8人死亡，1人重伤，3人失踪。事后经调查证实，这次事故的罪魁祸首是粮食粉尘——爆炸是由粮食粉尘所引起的。根据测算与试验证实，每立方厘米空气中含0.3毫升粉尘时，一遇火星、火苗或其他热源，就会由燃烧而引起爆炸。又据报道美国在近20年来发生了400多起粮食粉尘爆炸事故，造成200多人死亡和数千万美元的损失。粉尘爆炸是化学爆炸现象的一种，其他如煤矿中的瓦斯爆炸，甲烷、乙炔等的爆炸都属于化学爆炸现象。

最普通和典型的化学爆炸是炸药爆炸，炸药爆炸进行的速度高达每秒数千米到1万米之间。所形成的温度约3000—5000℃，压力高达数十万个大气压，因而能迅速膨胀并对周围介质作功。

## 三、核爆炸

核爆炸的能源是裂变（ $U^{235}$ 的裂变，如原子弹的爆炸）或

核的聚变(氘、氚、锂核的聚变,如氢弹爆炸)反应所释放出的能量。核爆炸反应所释放出的能量比普通炸药爆炸放出的化学能要大许多倍。核爆炸时可形成数百万到数千万度的高温,在爆炸中心区造成数百万到几千万大气压的高压,同时还有很强的光和热的辐射以及各种放射性粒子的贯穿辐射。因此比炸药爆炸具有大得多的破坏力。核爆炸的能量约相当于数万吨到数千万吨 TNT 炸药爆炸的能量。

第二次世界大战结束前,美国在日本广岛、长崎所投的两颗原子弹,能量都仅有 2 万吨级。是目前战略核武器中最小的,但这两个原子弹所造成的人员伤亡都达几十万人。并把广岛、长崎这两个城市基本摧毁,至今还使人们谈虎色变。所以数千万吨级的氢弹,其破坏力是可想而知了。可是在宇宙空间有更大的爆炸现象,如 1979 年 3 月 5 日在太阳系中不同位置上运行的 9 颗人造卫星,同时记录了在遥远空间发生的一次大爆炸的两种射线(伽玛射线),科学家们认为“这是有史以来人们所见到的一次最剧烈的爆炸,其亮度至少比脉冲星释放的能量大 100 万倍”(脉冲星是年轻的旋转的中子星,它们在宇宙中属于具有最强大能源的恒星之列)。这次爆炸的强烈程度,使科学家们在第一次看到这次爆炸的记录材料时,惊讶得说不出话来。科学家认为这次爆炸释放能量的比率比太阳的能量释放大 1000 亿倍。如果同样的爆炸发生在银河系附近某个地方的话,它将使地球的大气层变得灼热。如果太阳喷出同样数量的能量,地球就要立刻汽化。根据科学家的分析,这次爆炸看来发生在一个叫做大麦哲伦云的星系中。这个星系距离地球 18 万光年,由于人造卫星记录下来的伽玛射线有 20% 的红移,科学家认为,这是来自中小星的一次爆炸,一些科学家对这次大爆炸至今仍感到迷惑不解。认为这

次爆炸提出了一些物理方面的，关于这样巨大的能量怎样能够产生的重要问题。遗憾的是这次爆炸的记录一直到1983年初才为科学家们分析认识到。

谈到这里，人们总是把爆炸与炮火连天、山崩石裂、墙倒屋塌，甚至血肉横飞的情景联系在一起。可是随着医学科学的发展，人们却把爆炸用于医治疾病。80年代初，在西安市中心医院，医生和工程技术人员把一枚特小型的“炸弹”通过病人的尿道送进他的膀胱。接通电流之后，只听“嘭”的一声，病人膀胱内的结石即被炸碎，被炸碎后的结石，也就随着尿液而排出，病人的病痛就这样被解除了。这种发生在人体内的爆炸，使炸药爆炸技术进入了医学科学领域，开始为人类的健康造福。

用炸药碎石治疗膀胱结石的方法，是当前比较有把握而又无痛苦的有效方法，这种炸药装置和战争中的炸弹、炮弹、矿山、工地的炸药包有显著的不同。它具有以下5个特点：(1)具有破碎结石的威力，体积又微型化，重量以毫克算，便于输入膀胱；(2)因是在膀胱内足够的缓冲液中进行定向爆破，爆炸时产生的高温、高压、冲击波等不会伤害人体内的组织；(3)炸药的主要成份是迭氮化银，爆炸后的主要产物——银和银的化合物，量少而又毒性很小，且大部分可随缓冲液排出体外，残留部分也可随尿液排出；(4)炸药装置简单安全，除了通电外，其它任何压力、撞击都不会引爆；(5)有防水性能。具有以上特点的这种“微型炸弹”，规格有1毫克至20毫克不等的数十种，可根据病人的结石大小来决定。

从上述两个例子可知，既有大得使人难以想象的宇宙中的爆炸，又有小到只有几个毫克炸药的爆炸。这些爆炸从量的概念上来看是相差非常远的，但是爆炸的基本理论是相同

的。目前各种爆炸现象已成为专门的科学研究对象，并已有专门的论著。本书只讨论由炸药化学反应过程所引起的爆炸现象及其规律性，阐述爆炸的一些基本理论，并为满足工程技术人员及有关读者的需要，也介绍一些爆炸在工程应用方面的材料。

## § 1-2 爆燃、爆炸与爆震

爆燃(燃烧)、爆炸、爆震(爆轰)三者都是某一系统物理和化学反应的过程，都有能量的释放。但由于反应过程速度的快慢，而分为爆燃、爆炸和爆震。现分别介绍这三种现象。

燃烧过程进行得比较缓慢，并且其传播速度是变化着的，通常是每秒数厘米到数米。燃烧的传播速度与外界压力有着密切的关系，它随着压力的提高而迅速增加，当速度提高到某一个值时，则由燃烧(爆燃)转化为爆炸，爆燃是具有光和热效应，而没有声效应。

爆炸的特点是在爆炸点压力有急剧地突变，因此由爆炸产生的爆炸气体(或爆炸产物)由于高压而急剧地冲击周围介质，因而导致在爆炸点周围物体的破碎和强烈的变形。爆炸反应过程中不仅有光和热效应，且伴随有强烈的声效应，可以听到震耳欲聋的声响。爆炸的传播速度是可变的，一般每秒达数千米到1万米，爆炸与外界条件关系不大。

对于一定的爆炸物在一定的条件下，爆震是以恒定的速度传播，而且爆震速度超过该物质中声速的传播速度。从现象的特性和本质来说，爆震与爆炸并无不同之处，由于爆炸的传播速度是可变的，而爆震的传播速度是恒定的，所以可以说爆震是爆炸的一种定常状态。对于每一种炸药来说，爆震传

播速度在给定条件下是一个固定的常数，这是爆震的最主要特性之一。

我们将炸药的化学反应分为燃烧、爆炸、爆震三种基本形式，其实这并不完全恰当，因为正如前已谈到的，爆炸与爆震就其本质来说并无差别。只不过其传播速度一个是可变的，称之为爆炸，而另一个是不变的，称之为爆震(或爆轰)。可以认为爆炸也是爆轰的一种现象，称为不稳定爆轰，而对于传播速度恒定的称为稳定爆轰。在爆轰条件下，爆炸具有最大的破坏作用。

爆炸与爆震过程，就其传播的机理而言，与燃烧过程有重大的不同；燃烧是通过热的传导，扩散和辐射在炸药质量中传播的，而爆炸和爆震是通过冲击波压缩物质而传播的。下面介绍燃烧(爆燃)过程与爆震过程不同的基本特点：

1. 燃烧时反应区的能量是通过导热，气体产物的扩散和辐射而传入原始炸药的，但在爆震时，能量与爆炸反应的连续起爆是借助于冲击(压缩作用)波沿炸药的传播来实现的。

2. 燃烧的传播速度大大低于爆震的传播速度，燃烧传播速度通常约为每秒数毫米到每秒数米，且燃烧速度永远小于原始炸药中的声速(在通常情况下比声速低得多)。这是因为传热和扩散是比较缓慢的过程。但是爆震的过程则恰恰相反，它的传播速度大大地超过原始炸药中的声速。

3. 燃烧时，在火焰后的燃烧产物向后运动，而在爆震过程中则恰恰相反，爆轰产物是向前运动。因此，在火焰区域内燃烧产物的压力大大低于在爆轰波后的压力。

4. 在一定条件下，绝大多数的炸药都能够稳定地燃烧而不爆震。在炸药燃烧的条件下，化学反应的速度与性质主要取决于外界压力。例如，低氮硝化纤维素及其它某些复杂的

硝酸酯在相当低的压力下(30—50 大气压)燃烧时,会产生一氧化碳和甲醛,而在较高的压力下(大约几百个到几千个大气压)就不会产生上述情况。在压力很低的条件下(接近点火极限),许多混合气体的燃烧是按链式反应机理进行的。但在压力相当大的条件下,按热机理进行的反应具有重大的意义。

### § 1-3 炸药爆炸的特征

从热力学意义上来说,炸药是一种相对地不稳定的系统,它在外界作用的影响下能产生极其迅速的放热反应,同时生成强烈压缩状态的高温、高压气体。例如一个炸药包(学术术语称为装药)用雷管引爆时,我们首先看到炸药包在瞬时之内化为一团火花,形成烟雾,并产生强烈的声效应,且对周围介质生成极强的爆炸冲击波,可造成周围建筑物的破坏或受强烈的振动,或使人员伤亡。

从上述爆炸现象我们可以知道,出现一团火花说明炸药在爆炸过程中是放热的,因而形成高温而发光;爆炸在刹那间(几个微秒之内)完成,这说明爆炸过程是极其高速的;仅用一个很小的雷管即可将无限大包的炸药引爆,再如将导爆索(一种像绳索一样的爆炸物,其主要成分是黑索金)直线(或任意)铺设到 7 公里左右长度,只要在导爆索的一端用雷管引爆,就可将 7 公里左右的导爆索在一秒钟内爆炸完毕,这说明导爆索的爆炸传播速度(爆速)是每秒 7000 米左右。同时也说明了雷管引起炸药爆炸后,炸药中所产生的爆炸反应过程是能够自动传播的;另外,爆炸后出现的烟雾表明炸药在爆炸过程中有大量爆炸气体(或爆炸产物)产生,而气体因高压的缘故,又要极迅速地向外膨胀而形成冲击波,进而造成建筑物破坏

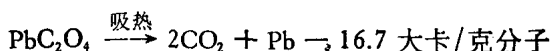
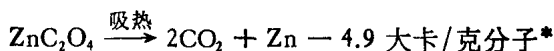
或受到震动。

综上所述,炸药爆炸过程的三个特征是;其一是过程的放热性,其次是过程的高速度,并能自行传播,再是过程中生成大量气体产物。这三个过程在不同的炸药中可以有不同程度的表现,可是它们却是任何化学反应成为爆炸反应的必要条件。三者互为因素,互相关联,缺一不可。

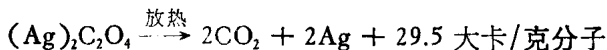
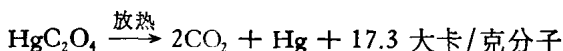
下面我们对每个过程作一概要的介绍。

## 一、反应过程的放热性

热的释放,是爆炸的第一个必要条件。没有这个条件,爆炸过程根本不可能产生。如果反应不伴有热的释放,那么,反应便不可能自发地进行,因而也不可能出现爆炸的自动传播。例如草酸盐就有吸热和放热两种不同的反应过程:如



因为它的分解是吸热反应,不能发生爆炸,可是



因为它的分解是放热反应,就能够发生爆炸。

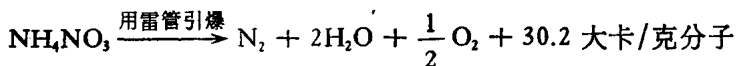
再如硝酸铵在未发明雷管之前,人们只把它用来作为农业上的肥料,因为它在低温加热的条件下能分解反应



---

\* 1 卡 = 4.1868 焦耳; 1 克分子 =  $10^3$  摩尔/毫米<sup>3</sup>(下同)。

很明显上式是不能产生爆炸条件的。可是自从发明雷管之后，硝酸铵在雷管引爆的条件下，其反应式是



由上式可见是能发生爆炸反应的，由此硝酸铵可作为一种爆炸物。

由此可见，即使是同一个物质，其反应是否具有爆炸性，决定于反应过程是否能放出热量，只有放热反应，才可能具有爆炸性。显然，要求以外界能源维持其分解的物质，不可能具有爆炸的性质，而炸药内部却正好具有使其本身分解的能量（再加上适当的条件，即可引起爆炸）。

依靠反应过程中的热能，爆炸气体（或爆炸产物）被加热到数千度，随后发生膨胀而形成冲击波，反应热和反应传播速度愈大，则爆炸的破坏作用也愈大。

反应热是炸药工作能力的一个标志，也是它的一个最重要的特性。爆炸反应过程所放出的热称为爆炸热（或爆热），在一般工程技术中广泛应用的常用炸药的爆热约在 900—1800 大卡/千克之间。

## 二、反应过程的高速度

爆炸反应与一般化学反应的一个最突出的不同点，是爆炸过程具有极高的速度。炸药向最终的爆炸产物的转变是在数十万分之一到数百万分之一秒内发生的，能量释放的巨大速度正是炸药较一般燃料的优越之处。但是从相等重量的总能量的贮藏来说，即使是能量最丰富的炸药也比不过一般的燃料系统。