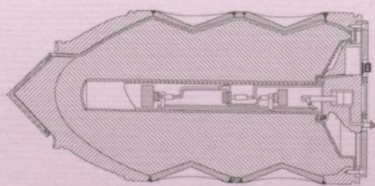


宁建国 编著

方方面面话爆炸



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

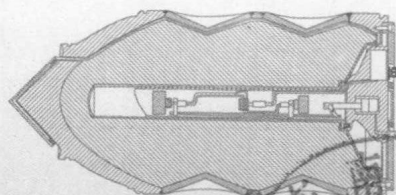
大众力学丛书

038
7

Fangfang Mianmian Hua Baozha

方方面面话爆炸

宁建国 编著



SEU 2515818



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

方方面面话爆炸/宁建国编著. —北京: 高等教育出版社, 2011. 8

ISBN 978 - 7 - 04 - 032275 - 0

I. ①方… II. ①宁… III. ①爆炸力学 - 普及读物 IV. ①O38 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 130698 号

策划编辑 王 超 责任编辑 王 超 封面设计 赵 阳 版式设计 范晓红
插图绘制 尹 莉 责任校对 陈旭颖 责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400 - 810 - 0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京铭成印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	850mm × 1168mm 1/32		http://www.landaco.com.cn
印 张	9	版 次	2011 年 8 月第 1 版
字 数	220 千字	印 次	2011 年 8 月第 1 次印刷
购书热线	010 - 58581118	定 价	29.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 32275 - 00

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

陈立群 戴世强⁺ 刘延柱 苗天德 余振苏

隋允康 王振东 武际可^{*} 叶志明 张若京

仲 政 朱克勤 朱照宣

(注：后加^{*}者为主任委员，后加⁺者为副主任委员)

中国力学学会《大众力学丛书》

总序

科学除了推动社会生产发展外，最重要的社会功能就是破除迷信、战胜愚昧、拓宽人类的视野。随着我国国民经济日新月异的发展，广大人民群众渴望掌握科学知识的热情不断高涨，所以，普及科学知识，传播科学思想，倡导科学方法，弘扬科学精神，提高国民科学素质一直是科学工作者和教育工作者长期的任务。

科学不是少数人的事业，科学必须是广大人民参与的事业。而唤起广大人民的科学意识的主要手段，除了普及义务教育之外就是加强科学普及。力学是自然科学中最重要的一门基础学科，也是与工程建设联系最密切的一门学科。力学知识的普及在各种科学知识的普及中起着最为基础的作用。人们只有在对力学有一定程度的理解后，才能够深入理解其他门类的科学知识。我国近代力学事业的奠基人周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀先生和其他前辈力学家非常重视力学科普工作，并且身体力行，有过不少著述，但是，近年来，与其他兄弟学科（如数学、物理学等）相比，无论从力量投入还是从科普著述的产出来看，力学科普工作显得相对落后，国内广大群众对力学的内涵及在国民经济发展中的重大作用缺乏有深度的了解。有鉴于此，中国力学学会决心采取各种措施，大力推进力学科普工作。除了继续办好现有的力学科普夏令营、周培源力学竞赛等活动以外，还将举办力学科普工作大会，并推出力学科普丛书。2007年，中国力学学会常务理事会决定组成《大众力学丛书》编辑委员会，计划集中出版一批有关力学的科普著作，把它们集结为

《大众力学丛书》，希望在我国科普事业的大军中团结国内力学界人士做出更有效的贡献。

这套丛书的作者是一批颇有学术造诣的资深力学家和相关领域的专家学者。丛书的内容将涵盖力学学科中的所有二级学科：动力学与控制、固体力学、流体力学、工程力学以及交叉性边缘学科。所涉及的力学应用范围将包括：航空、航天、航运、海洋工程、水利工程、石油工程、机械工程、土木工程、化学工程、交通运输工程、生物医药工程、体育工程等等。大到宇宙、星系，小到细胞、粒子，远至古代文物，近至家长里短，深奥到卫星原理和星系演化，优雅到诗画欣赏，只要其中涉及力学，就会有相应的话题。这套丛书将以图文并茂的版面形式、生动鲜明的叙述方式，深入浅出、引人入胜地把艰深的力学原理和内在规律介绍给广大读者。这套丛书的主要读者对象是大学生、中学生以及有中学以上文化程度的各个领域的人士。我们相信本套丛书对广大教师和研究人員也會有参考价值。我們歡迎力學界和其他各界的教師、研究人員以及對科普有興趣的作者踴躍撰稿或提出選題建議，也歡迎對國外優秀科普著作的翻譯。

丛书编委会对高等教育出版社的大力支持表示深切的感谢。出版社领导从一开始就非常关注这套丛书的选题、组稿、编辑和出版，派出了精兵强将从事相关工作，从而保证了这套丛书以优质的内容和崭新的形式亮相于国内科普丛书之林。

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

2008年4月

前言

Preface

大众
力学
丛书

所有爆炸都有一个共同特点，就是在相对狭小空间和短促时间内有巨大能量的释放和转化。这种剧烈的事件发生，必然导致周围发生破坏性的变化，带来不可逆转的可怕后果，因此人们往往谈“爆”色变。追根溯源，古代中国的术士们在炼丹时发生意外爆炸，偶然发现了火药的原始配方，并传入欧洲，成为火器的萌芽。火药的发明使人类战争从冷兵器时代进入热兵器时代，刀剑造成的近距离点杀伤变成了枪炮造成的远距离面杀伤，每次战争的伤亡人数由数千人飙升至几十万人。二战末期发明的原子弹更具大规模灭绝性的意义，这标志着人类战争从此进入核武时代，核武成为悬于人类头顶的达摩克利斯之剑。

纵观整个历史，每一次武器技术的进步既使战争方式发生翻天覆地的变化，同时也促进了人类文明的进步。现代武器技术应用了人类科学技术中最先进的研究成果，爆炸技术则是热兵器技术的剑刃矛尖，从某种意义上说，它是促进近现代人类进步和社会发展的巨大推动力。

科学家们铸剑为犁，爆炸技术也在战争中得到检验后逐渐用于造福人类。在生产生活中，利用爆炸可进行建筑物拆除、土石方开挖、矿山开采、航空航天、产品加工、材料制造、节日庆典

等。爆炸产生的极强脉冲电流、脉冲磁场、极高压力、极高温度等等，在对其过程进行精密控制后，已成为某些科学研究必不可少的得力助手。除了人为制造的爆炸外，爆炸在自然界中广泛存在，雷电、地震、火山爆发、星体爆发、高速碰撞等现象也都属于爆炸的范畴。

作为一名从事爆炸科学技术研究的工作者，笔者倍感自豪的同时常常感慨爆炸现象的引人入胜、爆炸科学研究道路的艰辛及其广阔的发展前景。在完成自己感兴趣的学科科研工作之余，笔者觉得有责任和义务为广大青少年朋友写一点东西，以使他们对爆炸不再恐惧，并逐渐了解爆炸——大自然最绚烂的一面。

为浅显易懂，文中尽量以文字和图片说明问题，避免复杂的数学公式给读者的阅读带来不便。北京大学武际可教授在本书写作过程中给予了热情帮助和大力支持，北京应用物理与计算数学研究所朱建士院士，也在百忙之中抽出时间对本书进行了严格审阅并提出了许多中肯的建议，在此一并表示衷心感谢。由于水平和精力有限，加之时间仓促，文中多有不尽合理之处，敬请读者批评指正。

目 录

Contents

- 1 炸药与爆炸 / 1
- 2 爆炸的传播
——燃烧与爆轰 / 11
- 3 炸药是怎样起爆的 / 17
- 4 热兵器
——弹药 / 28
- 5 弹药上的控制器
——引信 / 38
- 6 冲击波的毁伤效应 / 46
- 7 生命收割者
——破片与杀伤 / 55

8	矛与盾的较量 ——穿甲、破甲、碎甲 / 65
9	战神的力量源泉 ——火炮内弹道 / 95
10	钻地武器、地雷与土岩介质中的爆炸 / 108
11	反舰武器与水中爆炸 / 124
12	爆炸的电磁、温度和压强效应 / 135
13	新式武器 ——电磁轨道炮 / 149
14	末日之刃 ——核爆炸 / 160
15	铸剑为犁 ——工程爆破 / 188
16	爆炸加工 / 205
17	五彩缤纷的烟火 / 218
18	粉尘气体爆炸、防爆与生活中爆炸的利用 / 233
19	火山与地震 / 243
20	宇宙中的爆炸 / 254

1

Chapter

炸药与爆炸

在影视战争片中，炮弹落地开花，随之土石飞溅，血肉横飞，这就是爆炸。逢年过节、喜日庆典，鞭炮声声、烟花缤纷、色彩绚烂，礼炮轰鸣，也是爆炸。一声巨响过后，香喷喷的爆米花呈现在我们眼前，还是爆炸。不过，这些只是爆炸现象中的一小部分。

什么是爆炸呢？爆炸两个字都从火字旁，可知它是一种与“火”，即与能量有关的现象。我们从不同的爆炸现象中归纳它们的共同特点，把它看作是在较短时间和较小空间内，使能量从一种形式向另一种形式快速转化并伴随产生高压、高温以及冲击波等效应的现象。

提到爆炸，自然会想到炸药。顾名思义，它是一种能引发爆炸的“药”。我国大约在中唐时期就有了用硝石、硫磺和碳粉制作黑火药的配方，它是我国四大发明之一。古代也称为火药。不过那时的炸药威力并不十分大，大多是作为烟火花炮使用，后来经过不断改进，逐渐用于火炮。

现代的炸药是瑞典化学家诺贝尔 (Alfred Nobel, 1833—1896,

图 1.1) 发明的。1864 年的一天, 在瑞典斯德哥尔摩的市郊, 诺贝尔鼓捣炸药的工厂随着一声巨响化为灰烬, 诺贝尔的弟弟和四位助手命丧黄泉, 诺贝尔幸免于难。几经失败, 诺贝尔终于在 1887 和 1888 年取得了代那买特 (dynamite, 以硅藻土吸收硝化甘油制成) 和雷管 (以雷汞装药) 的专利。之后他凭借这些专利成了巨富。晚年, 可能是出于对在战争中因他的发明而导致无数生灵被残杀的忏悔, 他变为一位和平主义者, 并且将他财富的大部分捐献出来成立国际奖项——和平奖、文学奖、化学奖、物理学奖和医学奖, 后来于 1969 年后人又增加了经济学奖。这就是当今世界上最负盛名的奖项——诺贝尔奖。



图 1.1 诺贝尔像^[11]

有了火药和炸药的发明, 人类的战争才由“冷兵器”阶段发展到“热兵器”阶段。杀伤力也随之大为提高。

炸药爆炸是化学能快速向机械能转化的过程, 其功率和功率密度都非常大。每千克 TNT 的能量当量约为 $4\,190\text{ kJ}$, 功率约为 $5.6 \times 10^8\text{ kW}$, 功率密度约为 $9.3 \times 10^5\text{ kW/cm}^3$ 。当前最大的汽轮机发电机组的功率不过 $1.3 \times 10^5\text{ kW}$, 而体积却比 1 kg 炸药大得多。这样高的功率和功率密度必然表现为突然出现的高压, 从而对周围介质产生强烈的冲击, 进而为人们用来攻坚和加工成型。

爆炸现象多种多样, 不过大致可以分成三大类: 物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。在自然界中还有一些未探明原因的爆炸, 我们称之为第四类爆炸。

炸药的爆炸,是伴随快速化学变化的爆炸。矿井瓦斯爆炸、可燃性粉尘爆炸等等,都属于化学爆炸。

物理爆炸是爆炸过程不伴随化学变化的一种爆炸,例如:由过热水转变为过热蒸汽,压力迅速升高,超过锅炉的强度极限引起的锅炉爆炸;高压气瓶由于压力过高,超过了气瓶耐压极限而引起气瓶突然破裂,都是物理爆炸。此外,夏季的一次雷电,是把几十亿伏的电压、强度 100 kA 以上的电流,在千万分之几秒内释放出来,形成一万℃以上的高温,使空气急剧膨胀的爆炸(图 1.2)。地震、高速物体的碰撞等是弹性压缩能引起的物理爆炸。当然,在这些物理爆炸过程中也不排除局部或细节上发生化学变化。

原子弹、氢弹等武器的爆炸,是由于核裂变或核聚变反应引起的,称为核爆炸(图 1.3)。核爆炸在能量和爆炸速度上远大于上述两类爆炸。例如,5 kg 铀全部裂变仅需几微秒,释放能量 1 亿千瓦时,相当于 10 万吨 TNT 炸药爆炸的能量,因此比炸药爆炸具有更大的破坏力。核爆炸除产生冲击波作用外,同时还产生很强的光和热辐射以及各种粒子辐射。与之相比,密度为 1.6 g/cm^3 的 10 万吨 TNT 球形装药,装药半径为 77.7 m,若爆轰速度为 7 000 m/s,球中心起爆,则需要 11 ms 的时间才能爆轰完毕。释放同样的能量,后者所需时间是前者的数万倍。

大众
力学
丛书



图 1.2 闪电属于物理爆炸的一种^[12]

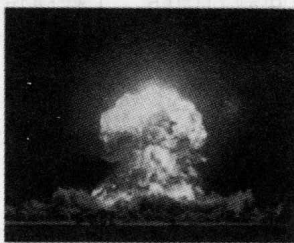


图 1.3 核爆炸(美国核试验)^[13]

通常是把核爆炸释放能量和 TNT 炸药爆炸释放能量相比较,并以多少吨 TNT 当量为单位来描述核武器的量级。1961 年 10 月 30 日苏联在新地岛投下了历史上最大当量的核弹,相当于 5 800 万吨 TNT,影响所及甚远,北极圈附近连同北美北部的无线电通讯都为之中断。

除了以上三类爆炸现象外,还有一些至今未探明原因的爆炸现象。例如,体积类似太阳的类星体,释放的能量却比一般星系能量大上几千倍(图 1.4)。黑洞是死亡恒星的残骸,其巨大的引力使得光线也逃不出去,但是科学家们预测黑洞也会不断蒸发直到最后爆炸而消失。一些宇宙学家认为,现在的宇宙也是在一次大爆炸中诞生的,而且这一过程至今尚未结束。这到底是怎么回事,尚待深入研究。



图 1.4 类星体 3C273
(哈勃望远镜拍摄)^[14]

随着经济发展,认识爆炸现象的本质,研究和掌握爆炸发生、发展及对周围介质作用的规律,变得越来越重要和迫切。如高速冲击、高压、超高压状态下的材料性能、爆炸过程中各物理量的计算、爆炸测试手段的提高等等,新的课题不断出现。解决这些问题对国防、工程建设和防护具有重大的实际意义。

对爆炸有一个粗略的认识后,我们回头看一看炸药。炸药是指能够发生化学爆炸的物质(图 1.5)。炸药的种类繁多,它们的组成、物理性质、化学性质、爆炸性质等各不相同。按用途可以将炸药分为四大类,即起爆药、猛炸药、烟火剂和发射药。

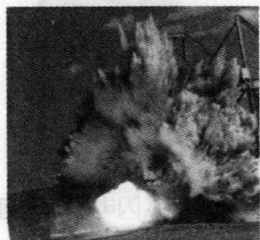


图 1.5 炸药爆炸^[15]

起爆药:起爆药对外界作用十分

敏感, 轻微的外界刺激(如机械、热、火焰), 就能引发爆炸, 并在极短时间内于毫米量级的距离由燃烧转变为爆轰。将起爆药装在一个金属壳体内可以相当安全。常见的起爆药有叠氮化铅 $[\text{Pb}(\text{N}_2)_2]$ 、雷汞 $[\text{Hg}(\text{ONC})_2]$ 、三硝基间苯二酚铅(即史蒂酚酸铅) $[\text{C}_6\text{H}(\text{NO})_3\text{O}_2\text{Pb}]$ 、二硝基重氮酚 $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_2\text{ON}_2]$ 等。起爆药主要用于装填雷管或其他起爆装置。它在一个爆炸装置中最先发生爆炸, 因而也称为初级炸药、主发炸药或第一炸药。

猛炸药: 猛炸药是主要的爆炸做功装药, 对介质有猛烈的破坏作用, 因此而得名。和起爆药相比, 在一般条件下, 用简单的激发冲量不能引发爆轰, 需要较大外界能量作用才能发生爆炸。使用时通常需要借助起爆药的爆轰来激发其爆轰, 因此有时也称猛炸药为高级炸药、次发炸药和第二炸药。猛炸药又有军用和民用之分。猛炸药在军事上主要用于各种弹药的爆炸装药和爆破器材制造; 在民用上主要用于开矿、采石、建筑拆除等以及各种爆炸成型。猛炸药的消耗量很大, 经常使用的猛炸药有 TNT(梯恩梯)、RDX(黑索今)、奥克托今、PETN(泰安)、特屈尔、硝化甘油、B 炸药、民用工业用的乳化炸药等, 以及各种混合炸药。

烟火剂(烟火药): 在隔绝外界氧气的条件下能燃烧, 并产生光、热、烟等效应的混合物。其主要成分为氧化剂、可燃剂、黏合剂和其他附加物, 用于制造焰火、爆竹等; 军事上用于制造照明弹、燃烧弹、信号弹、曳光弹、有色发烟弹等。烟火剂也可以发生爆炸, 但是实际应用中只使其发生燃烧。

发射药(推进剂): 其主要化学变化形式是燃烧, 可以在没有外界助燃剂的参与下, 在相当宽的压力范围内保持有规律地燃烧而放出大量的气体和热能, 产生抛射和推送作用。因此, 被用于发射武器的能源(热兵器时代), 如火炮的发射药、火箭发动机的推进剂。其主要代表有黑火药、单基发射药、双基发射药、

高分子复合发射药。单基火药又称硝化棉火药，主要成分为硝化棉(硝化纤维)，含硝化纤维 95%，主要用做枪炮的发射药。双基火药又称硝化甘油火药(以两种主要成分为基础)，其主要成分为硝化棉(NC)和硝化甘油(NG)或其他活性硝酸酯(硝化乙二醇)，硝化甘油和硝化乙二醇是硝化纤维的溶剂，它们挥发性很小，因此这类发射药又称难挥发溶剂发射药，主要用于迫击炮、加农炮、榴弹炮等的发射药。高聚物复合火药用于火箭的发射装药，又称固体推进剂，其主要成分是以高分子化合物、金属粉(铝粉)等作为可燃剂，固体氯酸盐(如高氯酸铵)等作为主要氧化剂，主要用于战术和战略火箭中。

我国古代发明的黑火药现在仍被广泛使用(图 1.6)。由于黑火药易于点燃、燃烧迅速、点火能力强、性质稳定，目前仍然广泛用于制作导火索、点火药、传火药等。明代茅元仪在《武备志·火药赋》中写道，“硝性竖而硫性横”，明确提出了与



图 1.6 黑火药^[16]

现代“发射”和“爆炸”大致相当的“直击”和“爆击”两个概念。宋应星的《天工开物》则说，“硝性至阴，硫性至阳。阴阳两神物相遇于无隙可容之中。”借用中国古代传统的阴阳对立转化之说，形象地描述了硝硫在一定条件下发生的氧化还原反应。

炸药按组成主要分为两大类，即爆炸化合物(单体炸药，又称分子内炸药)和爆炸混合物(混合炸药，又称分子间炸药)。

单体炸药即爆炸化合物，分子内含有氧化性基团和可燃元素——分子内炸药。混合炸药即爆炸混合物，混合物组成内的组分之间发生氧化反应——分子间炸药。根据 —NO_2 与 C、N、O 的连接又可分为硝基化合物、硝(基)胺化合物、硝酸酯三大类。TNT(梯恩梯)、RDX(黑索今)、PETN(泰安)是这三类单体炸药

的典型代表。

炸药具有以下特点:

(1) 高能量功率密度——单位体积所能释放的能量功率高。

(2) 强自行活化物质——炸药在外部激发能作用下发生爆炸后, 在不需要外界补充任何条件和新物质参与下, 爆炸反应即能以极快速度自己持续进行, 并直至反应完毕。

(3) 亚稳定物质——炸药是危险品, 不安全, 但具有足够的稳定性; 从热分解角度看, 除起爆药外, 大部分猛炸药的热分解速率低于某些化学肥料及农药, 因此在很多情况下炸药不是一触即发的危险品。有实用价值的炸药必须具有足够的稳定性, 能够承受相当强烈的外界作用而不发生爆炸。

(4) 自供氧物质——炸药的燃烧和爆轰是分子或组成内组分之间的化学反应, 不需要外界供给氧气。因此, 当炸药着火时, 隔氧法灭火不仅不起作用, 反而可能造成燃烧转成爆轰, 导致更为严重的后果。

随着反应方式和环境条件的不同, 炸药的化学变化有热分解、燃烧和爆轰三种基本形式:

(1) 缓慢的化学变化——热分解特点: 分解反应在整个炸药内部进行, 反应速度主要取决于环境温度。

(2) 快速的化学变化——燃烧和爆轰特点: 化学反应不是在整个炸药体积内进行, 而是在某一局部如反应阵面或者说反应区发生化学反应, 以波的形式在炸药中传播。

炸药的燃烧和一般燃料的燃烧不同, 因为炸药本身既有氧化剂又有可燃剂。燃烧速度即反应阵面沿炸药表面法线方向传播的速度, 与外界压力关系密切, 压力升高, 燃烧速度显著增加, 一般情况下炸药燃烧的速度在几毫米到数百米每秒之间, 低于炸药中音速。少量的炸药铺成薄层在空气中可以发生比较缓慢的燃烧, 并不伴随着声响和压力升高效应, 但在有限的容积中(例如在枪弹或炮弹药筒内)燃烧, 燃烧十分迅速, 压力升高, 具有明