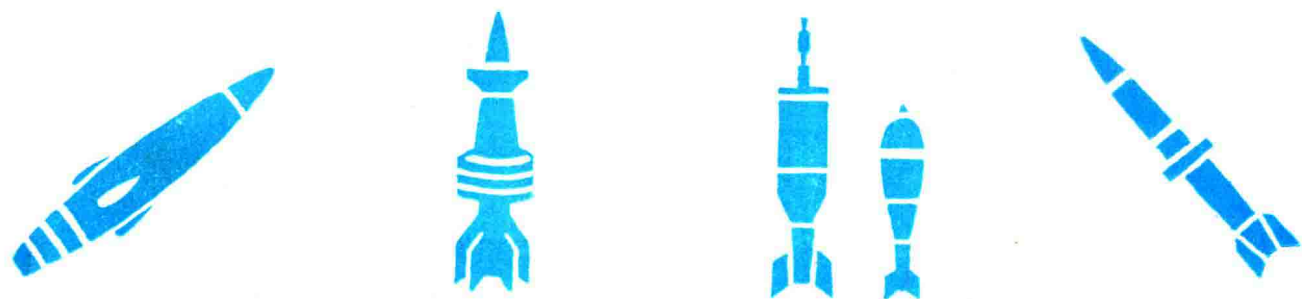


普通高等教育
兵工类规划教材

爆炸与冲击动力学

张守中 编著



兵器工业出版社

(京)新登字049号

爆炸与冲击动力学

张守中 编著

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京通县向阳印刷厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 31.25 字数: 767千字

1993年4月第1版 1993年4月 第1次印刷

印数: 1-1400 定价: 7.98元

ISBN 7-80038-480-2/TJ·75(课)

《弹药与战斗部工程》系列教材编委会

主编 魏惠之

常务副主编 张守中

副主编 周兰庭 孟宪昌

编委(按姓氏笔划排列)

王儒策 李景云 周兰庭 孟宪昌 欧阳楚萍

张守中 张景玉 赵文宣 赵有守 翁佩英

蒋浩征 董少峰 蔡汉文 魏惠之

《弹药与战斗部工程》系列教材书目及各书主编

1. 弹药学.....孟宪昌
2. 爆炸与冲击动力学.....张守中
3. 终点弹道效应学.....李景云
4. 弹药工程设计.....魏惠之
5. 战斗部工程设计.....周兰庭
6. 特种弹设计.....赵文宣
7. 药筒设计与制造.....张景玉
8. 相似与弹药模化.....欧阳楚萍
9. 弹药优化设计.....蒋浩征
10. 弹药可靠性技术基础董少峰
11. 弹药靶场试验翁佩英
12. 弹药CAD赵有守

出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神，中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下，在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任，建立了由主审审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组。以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针，兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代化人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由恽寿榕主审，经中国兵器工业总公司弹药引信专业教学指导委员会复查，兵总教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1992年8月

《弹药与战斗部工程》系列教材序言

《弹药与战斗部工程》系列教材是在国家教育委员会和中国兵器工业总公司领导下，系统总结建国以来弹药领域教学和科研实践经验，充分吸取国外有关科学技术成就，按照本专业人才培养规格要求，在选题上考虑了专业教学计划和课程设置，在取材内容上考虑了科学性、先进性和教学适用性，在编写中努力贯彻辩证唯物主义观点，是一套具有中国特色的专业教材。

《弹药与战斗部工程》系列教材共计12册，经过了较为严格的制订、审查程序。通过教学指导委员会统一课程教学大纲，确定主编人；通过主编人联席会议讨论教材编写大纲，协调各门教材内容，统一专业物理量名词、术语和符号；采用主审审查、责任编委复审制度，并且由教学指导委员会成立系列教材编委会，进行系列教材编审工作，对教材编审中有争议的问题进行再审查，确保教材编审质量。

《弹药与战斗部工程》系列教材由弹药引信专业教学指导委员会和兵总教材编审室具体组织完成。参加这套系列教材编写的作者，都是多年从事教学和科研工作的兵工院校教授、副教授。在此过程中，兵总教材编审室张守中副教授、华东工学院魏惠之教授、北京理工大学周兰庭教授、太原机械学院孟宪昌副教授对该系列教材作出了卓越的贡献。

《弹药与战斗部工程》系列教材由兵器工业出版社在“八五”期间陆续出版。这套系列教材所包含的12册书如下：

1.《**弹药学**》 弹药基本知识，目标特性及弹药分类，各种弹药的组成、结构特点、作用原理，弹药的评价及发展趋势等。

2.《**爆炸与冲击动力学**》 爆炸与冲击的基本现象，爆轰波的流体力学理论，爆轰产物膨胀和产生的初始冲击波，弹塑性应力波，三维弹性平面波，固体中的冲击波，板、管对爆炸与冲击的动态响应，以及超高速侵彻问题。

3.《**终点弹道效应学**》 目标的易损特性，破片技术和杀伤作用，对介质侵彻和穿甲作用，在介质中的爆破作用，聚能效应和破甲理论以及其他特种作用。

4.《**弹药工程设计**》 弹药设计的一般原理和计算方法，包括弹药或弹丸总体设计，结构特点分析，结构特征数计算；弹药发射设计，弹丸发射强度计算，膛内运动正确性分析，炸药安全性校核；弹丸飞行性能设计，气动力及稳定性计算，射弹散布分析；弹丸或战斗部终点效应设计，威力指标计算。

5.《**战斗部工程设计**》 战斗部工程的系统设计方法，杀伤、聚能、爆破、子母式等主要战斗部的设计原理，与战斗部产品技术设计有关的载荷分析、强度计算、装药安定性校核，材料、炸药选择，气动加热和防热设计，标识量和尺寸链计算，有关试验和评价方法。

6.《**特种弹设计**》 烟火技术基础，特种弹总体方案选择，弹体结构与强度，弹道与飞行稳定性(液体装填特性)计算等。

7.《**药筒设计与制造**》 各类药筒的典型结构，药筒在膛内的作用，退壳理论、设计及制造的基本原理和方法，焊接和可燃药筒的设计及工艺特点。

8.《相似与弹药模化》 弹药或战斗部设计和试验中的模化原理、方法及应用。此外，还介绍与弹药或战斗部爆炸有关的爆炸相似律以及爆炸成形模拟试验等相似律在民品中的应用。

9.《弹药优化设计》 优化设计总论，优化方法的数学基础，一维优化方法，无约束优化方法，约束优化方法，优化设计在弹药与战斗部工程中的应用。

10.《弹药可靠性技术基础》 弹药可靠性基础，弹药可靠性指标的确定及可靠性建模，弹药系统可靠性分析，弹药可靠性预计、分配、试验及评审。

11.《弹药靶场试验》 弹药产品定型与生产验收靶场试验(包括内、外弹道性能参数测定试验，弹药发射强度试验，发射安定性试验，威力性能试验等)中，主要性能试验项目的试验原理、方法和实施要求。

12.《弹药CAD》 CAD的硬件与软件，弹药数据库，计算机图形显示，自动绘图。

高等工业学校《弹药引信》专业教学指导委员会

1991.5.

前 言

本书作为《弹药与战斗部工程》系列教材之一，主要研究爆炸与冲击所产生的力学效应。炸药爆炸是一种极其迅速的能量释放和转化现象，弹体对目标的冲击也是一种能量急剧转化的过程，爆炸与冲击共同的特点是载荷强度高、作用时间短，以及在被作用物体内部造成极高的压力，引起被作用物体内部状态变化的动力学过程。作为动力学过程，把爆炸与冲击结合在一起，对于进一步理解材料对强冲击载荷动态响应的实质是颇有受益的。

爆炸与冲击在军事和民用上都有着广泛的应用范围。军用弹药是通过炸药爆炸和弹体对目标的冲击破坏目标，各种工程爆破、爆炸成型、爆炸焊接和爆炸复合等民用爆炸技术也都是爆炸与冲击的具体应用。本书为爆炸与冲击过程力学效应的利用、控制和防护问题提供理论基础。

作为专业理论基础教材，本书突出考虑了教材科学理论的系统性，每一个问题都是从基本方程入手，重点讨论在该条件下材料的状态方程或本构关系，然后在基本方程和材料状态方程的基础上展开对问题的研究。力求层次清楚、概念准确，注重体现循序渐进和理论结合实际的原则，并且附有一定数量的例题，以加深对问题的理解和深化。

本书按照弹药引信教学指导委员会统一的教学大纲进行编写。全书共分八章，第一章介绍爆炸与冲击的基本现象，引入材料对爆炸、冲击动态响应和波的概念；第二、三章介绍爆轰波的传播、爆轰产物的流动，以及在所接触介质形成的初始冲击波，重点讲述爆轰参数计算、爆轰波相互作用和爆轰波对外作用的力学过程；第四章介绍一维弹塑性应力波和一维弹塑性应变波，重点讲述弹塑性波的传播和相互作用；第五章介绍三维弹性平面波，重点讲述弹性平面波的叠加和在自由面上的反射，以此讨论层裂和角裂问题；第六章介绍管、板对爆炸、冲击动态响应的几种典型模型；第七章介绍固体中的冲击波，重点讲述高速撞击下固体中冲击波的相互作用和解析计算；第八章介绍超高速撞击与侵彻问题。该书除适于作为弹药、战斗部工程专业的基础课教材之外，也适合于作为工程爆破、爆炸加工等民用爆炸技术专业的基础课教材。并且，还希望为从事弹药与民用爆炸技术设计、研制、施工和防护的技术人员提供参考，有助于他们获得提高分析问题和处理问题的能力。

本书在编写过程中，参照了国内、外一些教材和科技书，有一些材料取自于国内、外专业刊物，在此一并向原作者致谢。

本书由北京理工大学恽寿榕教授担任主审，周兰庭教授担任责任编委。本书在编写过程中，北京理工大学蒋浩征教授、华东工学院魏惠之教授、太原机械学院孟宪昌副教授提出了宝贵意见；弹药引信教学指导委员会和兵总教材编审室的同志给予了大力帮助。在此，表示诚挚的感谢。

由于本人水平所限，错误之处在所难免，恳求读者批评指正。

编著者

1991年10月

目 录

第一章 爆炸与冲击的基本现象	(1)
§1-1 爆炸的现象和特征	(1)
§1-2 冲击的现象和特征	(6)
§1-3 介质对爆炸、冲击的响应	(14)
§1-4 介质中的波	(22)
参考文献	(26)
第二章 爆轰波流体动力学理论	(28)
§2-1 爆轰波基本方程	(28)
§2-2 爆轰产物状态方程	(35)
§2-3 爆轰参数近似理论计算	(40)
§2-4 凝聚炸药爆轰参数工程计算	(47)
§2-5 爆轰波的相互碰撞	(69)
§2-6 装药对爆轰传播的影响	(84)
§2-7 爆轰参数测定	(92)
§2-8 爆轰波形状的控制	(105)
参考文献	(110)
第三章 爆轰产物膨胀和初始冲击波	(112)
§3-1 爆轰产物膨胀的规律	(112)
§3-2 典型爆轰产物流场	(120)
§3-3 爆轰产物飞散的质量、动量和能量	(129)
§3-4 接触爆炸对刚壁作用的压力和冲量	(132)
§3-5 接触爆炸对物体的驱动作用	(140)
§3-6 爆轰波垂直入射时介质中冲击波初始参数	(145)
§3-7 爆轰波斜入射时介质中冲击波初始参数	(154)
参考文献	(174)
第四章 弹塑性应力波	(175)
§4-1 一维应力波基本方程和本构关系	(175)
§4-2 弹性波相互作用	(187)
§4-3 弹塑性波相互作用	(194)
§4-4 递减硬化材料的弹塑性波	(204)
§4-5 递增硬化材料的弹塑性波	(210)
§4-6 一维应变弹塑性波	(214)
§4-7 一维粘弹性波和一维弹粘塑性波	(229)
§4-8 应力波参数的测量	(238)

参考文献	(249)
第五章 三维弹性平面波	(250)
§5-1 弹性动力学基本方程和本构关系	(250)
§5-2 弹性波波动方程	(257)
§5-3 表面波	(261)
§5-4 弹性平面波的叠加	(265)
§5-5 弹性平面波在自由面上的斜反射	(278)
§5-6 弹性平面波在两介质界面上的斜入射	(287)
§5-7 层裂	(296)
§5-8 角裂	(304)
参考文献	(317)
第六章 板、管对爆炸与冲击的动态响应	(318)
§6-1 柱坐标下动力学基本方程	(318)
§6-2 材料本构关系	(319)
§6-3 薄板弹塑性变形	(333)
§6-4 钝头弹对薄板的撞击	(335)
§6-5 尖头弹对薄板的撞击	(346)
§6-6 内压作用下圆筒的变形	(357)
参考文献	(374)
第七章 固体中的冲击波	(376)
§7-1 固体高压冲击波基本方程	(376)
§7-2 固体高压状态方程	(377)
§7-3 固体介质在高压状态下的等熵流动	(393)
§7-4 高速撞击所产生的初始冲击波及其传播	(399)
§7-5 一维平面冲击波的相互作用	(415)
§7-6 二维定常流动极曲线方法	(428)
参考文献	(456)
第八章 超高速侵彻	(457)
§8-1 超高速撞击的特点	(457)
§8-2 超高速粒子对厚靶的侵彻	(458)
§8-3 超高速粒子对中等厚度靶板的侵彻	(467)
§8-4 超高速粒子对薄靶的侵彻	(473)
§8-5 金属射流对靶板的侵彻	(478)
§8-6 长杆弹对靶板的侵彻	(484)
参考文献	(490)

第一章 爆炸与冲击的基本现象

§1-1 爆炸的现象和特征

一、爆炸现象

所谓爆炸，是大量能量在有限体积和极短时间内快速释放或急骤转化的现象。例如，炸药化学能量的高速释放会产生爆炸；高速撞击时，撞击体动能的急剧转化会引起爆炸；石油液化气体与空气的混合物在外界点火时，可能会引起爆炸；面粉、煤粉或其它可燃粉尘悬浮于空气中，在一定条件下会引起粉尘爆炸；高压电流通过细金属丝(或箔)发生强烈的放电现象，放电区的高温、高压使金属迅速转化为气态而形成电爆炸；自然界中的雷电、地震、火山爆发，也都是爆炸现象。

爆炸现象就其产生的原因来说，可以分为化学爆炸、物理爆炸和核爆炸。

过热的蒸汽锅炉爆炸是典型的物理爆炸现象。在这种爆炸中，过热水迅速转变为蒸汽，而大量蒸汽的产生使锅炉内压力不断增加，当蒸汽压力超过锅炉能够承受的程度时，锅炉破裂，高压蒸汽急剧释放，形成爆炸。

高速撞击所引起的爆炸属于物理爆炸现象，其能源是撞击体的动能。高速运动的物体撞击在靶体上，其动能迅速转化为靶板的势能，使受撞击部位的压力和温度迅速提高，当撞击压力超过靶板材料强度极限时，在撞击部位将会造成变形或穿透。

大自然中的雷电也属于物理爆炸现象，其能源为电能。当距离比较近时，带有不同电荷的两块云彩会发生强烈的放电现象，电位差在微秒数量级内拉平，使放电区达到极其巨大的能量密度和数万度的高温，导致放电区空气压力急剧地升高，并在周围形成强烈的扰动。

炸药的爆炸，可燃气体或粉尘与一定比例空气的混合物的爆炸，属于化学爆炸。化学爆炸是通过化学反应将物质内潜在的化学能，在极短时间内迅速释放出来，转变为强压缩能，使爆轰产物处于高温、高压状态，气相爆轰和粉尘爆炸的压力可达 $2 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，凝聚炸药爆轰的压力可达 10^{10} Pa 以上，二者爆炸时的温度都可达 $(3 \sim 5) \times 10^3 \text{ K}$ ，这样的高温、高压气体产物必然急骤向外膨胀，在空气中形成强冲击波，造成被作用物体的变形和破坏。

原子弹、氢弹的爆炸属于核爆炸。原子弹是用铀 235 或钚 239 的裂变来实现的，铀 235 或钚 239 的原子核在中子的轰击下分裂成较轻的原子核，放出巨大的核能。氢弹是用氘、氚或锂的聚变来实现的，氘、氚或锂的原子核在极高温条件下结合成较重的原子核，也能放出巨大的核能。1g铀 235 全部进行核裂变放出的能量相当于 $2 \times 10^7 \text{ kg}$ 梯恩梯炸药的能量，1g氘元素全部进行核聚变放出的能量相当于 $1.4 \times 10^8 \text{ kg}$ 梯恩梯炸药的能量。核爆炸时，反应区温度达 10^7 K ，压力达 10^{15} Pa 以上，其能量以冲击波、光辐射和贯穿辐射等形式表现出来，对外界产生极其严重的破坏。因此，核爆炸是更加剧烈的爆炸现象。

综上所述，一般地说爆炸是一种极其迅速的物理或化学的能量释放过程，在此过程中系统的势能转化为运动的机械能，然后对外做功。从而表明爆炸过程呈现为两个阶段，在第一个阶段中，物质的潜在能量以一定的方式转化为强烈的压缩能；在第二个阶段中，压缩能急

剧烈地向外膨胀，在膨胀过程中对外做功，引起被作用物体的变形、移动和破坏。

爆炸的主要征象是爆炸点周围介质中压力突然急剧上升，这个急剧上升的压力是产生破坏作用的直接因素。爆炸的对外征象是由于介质振动而产生的声响效应。

二、炸药爆炸的特征^[1, 2, 3]

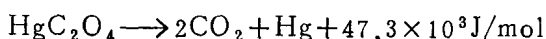
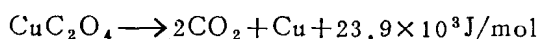
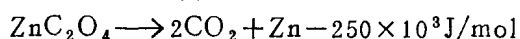
炸药是这样一种物质，在一定的外界条件作用下能够进行高速的化学反应，放出热量，并且产生大量的气体产物。

反应放热、过程的高速度和生成大量气体产物，是炸药爆炸所产生的三个特征，也是炸药爆炸所必须具备的条件，缺一不可不能称为爆炸现象。同样，也只有具备这三个条件的物质，才能称之为炸药。

1. 反应的放热性

放热是炸药爆炸的能源。爆炸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；没有这个条件，反应也不能自行延续，因而也就不可能出现爆炸过程的自动传播。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。

例如，草酸盐的分解反应可以作为典型的例子：



第一种反应是吸热反应，只有在外界加热的条件下才能进行，不具有爆炸性质；第二种反应具有爆炸性，但因放出的热量不大，爆炸性不强；第三种反应具有显著的爆炸性质。

爆炸反应所放出的热量称为爆热。它是爆炸破坏作用的能源，是炸药爆炸做功能力的标志。

2. 过程的高速度

过程的高速度是爆炸反应与一般化学反应的重要区别点。炸药爆炸反应大约是在微秒数量级时间范围内完成的，虽然炸药的能量贮藏量并不比一般燃料大，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无法比拟的。表1-1-1提供了石油、煤与几种炸药的放热量和能量密度数据。

表1-1-1 炸药与一般燃料的放热量和能量密度

物质名称	单位密度物质放热量 $Q/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	单位体积炸药或单位体积燃料-空气混合物能量密度 $q/(\text{kJ} \cdot \text{L}^{-1})$
煤	32.66	3.60
汽油	41.87	3.68
黑火药	2.93	2805
梯恩梯	4.19	6700
黑索金	5.86	10467

例如，1kg煤块燃烧可以放出32.66MJ的热量，这个热量是1kg梯恩梯炸药爆炸放出热量的7.8倍，可是这块煤燃烧的时间大约需要几分钟以至几十分钟，在这段时间内燃烧放出的热量不断以热传导和辐射的形式传递出去，因而虽然煤的放热量很多，但是单位时间的放热量

并不多。同时，还要注意到煤的燃烧是煤与空气中的氧进行化学反应而实现的，1kg煤完全反应需要2.67kg的氧，这么多的氧必须由9m³的空气才能提供，作为燃烧原料的煤和空气的混合物，单位体积所放出的热量也只有3600J/L，能量密度很低。

爆炸反应完全不同，炸药的爆炸传播速度达(5~8)×10³m/s，一块100mm见方的炸药爆炸反应完毕也只需要10us的时间。由于反应速度快，虽然总放热量不是太大，但在这短暂时间内的放热量却比一般燃料燃烧时在同样时间内放出的热量高出上千万倍。同时，由于炸药爆炸反应无需空气中的氧参加，在反应所进行的短暂时间内反应放出的热量来不及放出，以致可以认为全部热量都集聚在炸药爆炸前所占据的体积内，这样单位体积所具有的热量可达到10⁶J/L以上，比一般燃料燃烧的能量密度高出数千倍。

由于炸药爆炸反应过程速度很高，炸药内所具有的能量能够在极短时间放出，达到极能量密度，所以炸药爆炸具有巨大做功功率和强烈的破坏作用。

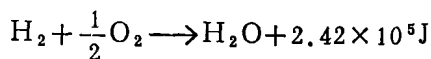
3. 反应过程生成气体产物

反应过程中有气体产物生成，是炸药爆炸反应的又一重要特点。爆炸瞬间炸药容积不变地转变为气体产物，其密度要比正常条件下气体的密度大几百倍到几千倍，也就是说正常情况下这样多体积的气体被强烈压缩在炸药爆炸前所占据的体积内，从而造成10¹⁰Pa以上的高压。这么高压力的气体产物必然急剧地向外膨胀，把炸药的潜能转化成气体运动的动能，对周围介质做功。在整个过程中，气体产物既是造成高压的原因，又是对外界介质做功的工质。表1-1-2提供了几种炸药爆炸反应生成的气体量。由表1-1-2看出，1kg炸药爆炸反应生成的气体产物换算到标准状态(1.0133×10⁵Pa, 273K)下的气体体积为7000~10000L，这个体积为炸药爆炸前所占据体积的1200~1700倍。

表1-1-2 某些炸药爆炸生成的气体在标准状态下所具有的体积

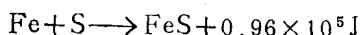
炸 药	1kg炸药生成的气体产物	1L炸药生成的气体产物
	V/(L·kg ⁻¹)	V/(L·L ⁻¹)
梯 恩 梯	740	1180
特 屈 儿	760	1290
泰 安	790	1320
黑 索 金	908	1630
奥 克 托 金	908	1720

气相爆炸时，产物体积一般变化不大。例如氢、氧混合物爆炸

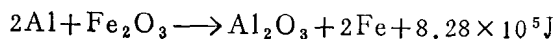


爆炸反应后产物体积换算到爆炸前条件下，其体积减少了1/3。但是，由于反应速度很快，而且放出大量热量加热反应产物，使其压力提高到10⁶Pa以上，然后再迅速向外膨胀做功，所以仍然具有爆炸性。

爆炸过程生成气体产物的重要性，还可以通过一系列不生成气体产物的反应看出。例如金属硫化物的形成反应



铝热剂反应



尽管反应非常迅速,且放出很多的热量,后一反应放出的热量足以把反应产物加热到3000K,但是终究由于没有气体产物产生,没有把热能转变为机械能的工质,无法对外做功,所以不具有爆炸性。

从上面讨论可以看出,炸药爆炸必须同时具备放热性、高速度、生成气体产物三种特征,缺一不可称之为爆炸。

三、炸药爆炸是一种激烈的化学反应形式

炸药在不同的条件下能发生三种基本形式的化学反应过程,即热分解、燃烧和爆炸。

热分解是炸药在通常的环境温度条件下不断缓慢进行着的自身分解反应。这种反应进行的速度取决于炸药所取的环境温度,温度愈高,反应速度愈快。这种化学反应影响炸药的安定性,热分解严重的炸药,安定性差,不易长期储存。

燃烧是一种激烈的化学反应形式。这种化学反应形式以波的形式在炸药中进行,此波称为燃烧波。燃烧波的传播速度就是燃烧速度,燃烧速度从mm/s数量级到 10^2 m/s数量级。

爆炸是最激烈的一种化学反应形式,这种反应形式以爆炸波的形式进行,一般炸药的爆炸传播速度为3000~9000m/s。

爆炸与燃烧的主要区别在于:

1. 燃烧与爆炸虽然都是以波的形式进行,但是传播速度绝然不同。燃烧传播速度为几毫米每秒到几米每秒,最大也只有几百米每秒,也就是说燃烧传播速度大大低于原始炸药中的声速;爆炸传播速度通常是几千米每秒,也就是说爆炸传播速度一定大于原始炸药中的声速。

2. 从传播持续进行的机理来看,燃烧时化学反应区放出的能量通过热传导、辐射和气体产物的扩散传入下一层炸药,激起未反应炸药进行化学反应,使燃烧持续进行;爆炸时,化学反应区放出的能量以压缩波的形式提供给前沿冲击波,维持前沿冲击波的强度,然后借助于前沿冲击波的冲击压缩作用激起下一层炸药进行化学反应,使爆炸持续进行。

3. 从反应产物的压力来看,燃烧产物的压力通常很低,对外界显示不出力的作用;爆炸时产物压力达 10^{10} Pa以上,爆炸向四周传出冲击波,有强烈的力学效应。

4. 从反应产物质点运动速度来看,燃烧产物质点运动方向与燃烧传播的方向相反,而爆炸产物质点运动方向与爆炸传播方向相同。

5. 从炸药本身装药条件来看,随着装药密度的提高,炸药颗粒间的孔隙减小,燃烧速度下降;而对于爆炸来说,随着装药密度的提高,单位体积物质化学反应放出的能量增加,使之对下一层炸药冲击作用加强,爆炸进行的速度增加。

6. 从外界条件影响来看,燃烧易受外界压力和温度的影响,其中压力的影响更为严重。当外界压力低时,燃烧速度很慢,随着外界压力的提高,燃烧速度加快,当外界压力过高时,燃烧变得不稳定,以致转变为爆炸。爆炸基本上不受外界条件的影响。

对于炸药爆炸习惯上采用两个名词:爆炸和爆轰。一般来说,具有爆炸三个特征(放热性,高速度,生成气体产物)的化学反应,皆称为爆炸,其爆炸传播速度可能是变化的;爆轰除了具备炸药爆炸的三个特征之外,还要求传播的速度是恒定的。因而,“爆炸”一般笼统定义具有爆炸三大特征的化学反应,而“爆轰”专门定义稳定传播的爆炸过程。

四、炸药爆炸性能的标志

炸药爆炸能够在极短时间内完成其化学反应,迅速将本身所具有的化学能转变成成为热

能，把反应产物瞬间加热到 $(3\sim 5)\times 10^3\text{K}$ 的高温，并在气体产物中造成 10^{10}Pa 以上的高压，使爆炸气体产物迅速向周围膨胀而做功。

为了定量地表示炸药爆炸的猛烈程度，以及表示炸药对外做功的能力，知道炸药爆炸放出的热量、爆炸传播速度、生成气体产物的数量、爆炸产物所达到的温度和压力，都是非常必要的。因而，全面评定炸药爆炸性能，经常采用与上述数据对应的五个标志量，即**爆热**、**爆速**、**爆容**、**爆温**和**爆压**，简称“五爆”。

1. 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 炸药或 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，它是炸药对外做功的能源。炸药爆热愈大，炸药对外做功的能力就愈大。

2. 爆温

炸药爆炸瞬间爆炸产物加热所达到的最高温度，称为爆温。其单位可以用热力学温度 K 或摄氏度 $^{\circ}\text{C}$ 表示。

爆温取决于爆热和爆炸产物组成。

3. 爆容

单位质量炸药爆炸时所生成的气体产物，换算在标准状态 $(1.0133\times 10^5\text{Pa}, 273\text{K})$ 下所占据的体积，称为爆容。通常以 1kg 炸药为单位进行表示，其单位为 L/kg 。

由于气体产物是爆炸所释放热量转变为机械能的工质，因而爆容这个性能参数也是爆炸对外做功能力的一个标志。

4. 爆速

爆炸过程沿着炸药装药稳定传播的速度，称为爆速。其单位为 m/s 。

炸药的爆炸过程是爆轰波在炸药中一层层地进行传播的过程。所谓爆速，也就是爆轰波在炸药装药中的传播速度。

5. 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。其单位为 Pa 。

由于爆炸过程中爆炸产物的压力是不断变化的，该处所指爆压为爆轰波末端面（或化学反应区末端面）处所具有的压力。爆压是炸药爆炸瞬间猛烈破坏程度的标志。

除了采用上述“五爆”参数之外，在实用中还经常采用威力和猛度这样两个相对表示炸药爆炸作用性能的参数。

1. 威力

威力是炸药对外做功的能力，主要取决于爆炸放出的热量和生成气体产物的多少。

炸药威力的理论示性数，可以用炸药的潜能表示，或者用炸药的爆热表示。实际上，由于爆炸反应的不完全性，以及爆炸放出的热量也不可能完全转变为机械能，因而这种表示只是一般性的。

实际应用中，炸药威力通常用铅铸试验来评定。即将一定量的炸药放在规定为标准的铅铸孔中进行爆炸，以爆炸后铅铸孔扩张的体积大小来表示炸药的威力；或以梯恩梯炸药的铅铸扩孔体积为基准，用相对值表示各种炸药的威力。

2. 猛度

猛度是指炸药进行局部破坏作用的能力。它主要取决于爆炸传播速度和爆炸瞬间气体产物压力的大小。

炸药猛度的理论示性数，可以用炸药爆炸时对其接触物体上的冲量表示。

实际应用中，炸药猛度通常采用弹道摆测定。即将一定量的炸药粘接在规定为标准的弹道摆上进行爆炸，以炸药爆炸产物传给摆体的冲量来表示炸药的猛度；或以梯恩梯炸药的试验猛度值为基准，用相对值表示各种炸药的猛度。

表 1-1-3 给出了常用炸药爆炸性能数据。

表 1-1-3 常用炸药爆炸性能数据

炸 药	密 度 $\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	爆 热 $Q_v / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	爆 容 $v_0 / (\text{L} \cdot \text{kg}^{-1})$	爆 速 $D / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	爆 压 P / GPa	威 力 $\varphi_V / (\%)$	猛 度 $\varphi_I / (\%)$
梯 恩 梯	1.64	4400	750	6950	19.6	100	100
特 屈 儿	1.70	4860	760	7560	25.2	125	116
黑 索 金	1.80	6200	908	8754	34.7	150	135
奥 克 托 金	1.90	6200	908	9100	39.3	145	
泰 安	1.77	5800	790	8300	33.5	140	129
硝 基 胍	1.70	3020	1070	7650	25.0	104	95
苦 味 酸	1.71	4186	700	7350	22.0	101	107
苦 味 酸 铵	1.55	3350		6850		99	91
地 恩 梯	1.52			6185	14.3	71	64
硝 化 甘 油	1.59	6700	690	7580	22.5	140	
B 炸 药	1.68	5100		7800	27.5	130	132
A IX-1	1.68			8420	28.3	127	125
A IX-2	1.77	6445	760	8090	25.0	150	116
8321 炸 药	1.71			8340	30.0	134	131
8701 炸 药	1.72	5110		8425	30.4	150	134
8702 炸 药	1.82	6820		7990	26.8	156	125
黑索金91/蜡9	1.59			8100	24.0	135	126
黑索金65/梯恩梯35	1.72	5050	845	7975	28.0	134	
黑索金60/梯恩梯40	1.72	5000	845	7900	27.6	133	132
黑索金50/梯恩梯50	1.68	4750		7750	25.5	130	115
特屈儿75/梯恩梯25	1.60			7385	21.6	122	118
特屈儿70/梯恩梯30	1.60			7340	21.4	120	117
泰安50/梯恩梯50	1.67	5100	780	7700	24.1	122	121
二硝基奈50/梯恩梯50	1.45			5830	13.0	75	
黑索金24/梯恩梯60/铝16	1.77	5170		7120	22.1	147	
黑索金65/铝32/添加剂3	1.90	7050		7880	24.9	142	118

§1-2 冲击的现象和特征

一、冲击现象

所谓冲击，是抛射体(弹体)以一定的速度向被撞击物(靶板)进行撞击，在撞击瞬间能量进行急骤转化的现象。一般说来，爆炸后期的效应大都转化为冲击现象，即使是炸药爆炸也转化为高压气体产物对周围介质的冲击。另外，高速撞击本身也是一种爆炸的形式——物理爆炸。因而，冲击与爆炸密切相关，有着许多相同的特征。

穿甲弹在火药气体推动下，其速度可以达到1500~2000m/s，当以这样的速度冲击靶板时，能量密度为 $(1\sim 2)\times 10^{10}\text{J/m}^3$ ，在冲击初始几微秒内冲击压力达 10^{10}Pa 以上，以其穿透靶板。

破甲弹金属射流在锥形聚能装药爆炸作用下，其射流头部速度可达8000m/s，射流头部具有的能量密度为 $2.4\times 10^{11}\text{J/m}^3$ ，在冲击初始几微秒内冲击压力达 10^{11}Pa ，以致在钢板上冲击出比射流本身直径大许多倍的孔径。

爆炸焊接也是一种冲击现象。爆炸焊接中两块金属板按照一定形式放置，对其中一块金属板铺上炸药，在炸药爆炸能量的作用下这块金属板向另一块金属板进行冲击，金属板冲击速度约800~2000m/s，其能量密度为 $(2.4\sim 15)\times 10^9\text{J/m}^3$ ，冲击点处压力达 10^9Pa ，在这样高的压力作用下，碰撞点处形成金属喷射，以致使两金属界面得到清理而达到金相连接。

任何可以被发射的东西都能够成为一个抛射体，军事上的弹体只是可抛射体的一小部分。日常见到的锤子敲打物体，高压水柱冲撞物体，大自然中微陨石对宇宙飞船和人造卫星的碰撞，都是冲击现象。

冲击现象共同特点是载荷强度高，作用时间短，尤其作用时间短是区别于一般力学现象的重要特征。在冲击现象中，作用时间一般为毫秒、微秒甚至毫微秒数量级，在这么短时间内完成施加高强度载荷，以及在被作用物体内部造成极高的压力(或应力)，引起被作用物体内部介质的运动和材料的破坏，这是一系列随时间剧烈变化的动态过程。

上述叙述中，采用了冲击和撞击两个词。一般说来，撞击专指固体抛射体对固体靶体的作用；冲击泛指抛射体对被撞击物的作用，这里所说的抛射体可能是固体、液体或高压气体，被撞击物也可能是固体靶体、液体或气体介质。本书所研究的冲击多为固体物之间的撞击，不过在普遍意义上写成“冲击”二字。

二、各种因素对冲击的影响

弹体冲击靶板所发生的现象，与弹体、靶板和冲击过程中的许多因素有关，这些因素主要是：弹体结构和材料特性，靶板结构和材料特性，冲击速度和角度，等。并且，冲击现象可以根据各种因素进行分类。

1. 弹体结构和材料特性

军事上的弹体多是具有各种头部形状、材料硬度很高的圆柱体，高压试验中的抛射体可能是球体和片状体，而大自然中飞行体则会有各种各样，小至砂粒，大到陨石，都可视作抛

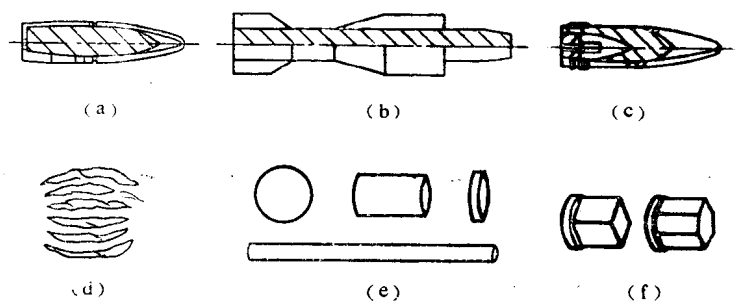


图1-2-1 几种常见的抛射体

- (a) 合金钢芯枪弹；(b) 长杆穿甲弹；(c) 穿甲爆破弹；
(d) 杀伤弹破片；(e) 模拟抛射体；(f) 模拟破片

射体，图1-2-1给出了几种常见的抛射体形状^[4]。

弹体的头部形状对靶板破坏的型式起着重要的作用。尖头弹对靶板的破坏很大程度上靠弹头对靶板的穿刺，尖头弹很容易穿透厚度不大的薄靶，然后随着弹体的前进，主要是一个扩孔过程。扩孔过程主要可以分成两类，一类是靶板材料在不断扩大的弹头截面挤压下被推向四周，这是一种塑性扩孔过程，适于延展性较强的塑性靶板材料；另一类是在弹孔扩展时产生径向裂纹，出现裂纹后的靶板，随着弹体的前进发生卷曲，形成花瓣型孔口，这种扩孔过程适于延展性较差的材料。钝头弹对靶板的破坏完全靠弹体对靶板的挤压，在弹体挤压作用下靶板中引起顺着冲击方向的质点位移，使弹体钝头周边相接触的靶板材料发生剪切变形，以致造成剪切冲塞破坏。

弹体长细比(弹体长度与其直径之比)是很重要的弹体结构参数，弹体长细比愈大，断面密度愈大，在同样弹体质量条件下侵入靶板的深度愈深，并且在大着角下也不易跳飞。但是，长细比大的弹体在冲击靶板过程中也存在不利的因素，一则弹体易出现折断，二则容易出现外弹道失稳。

与冲击效应有关的主要弹体材料参数，是弹体的密度和硬度。弹体密度愈大，弹体硬度愈大，弹体对靶板破坏的程度就愈严重，高强度合金钢、钨合金和铀合金都是制作弹体的理想材料。

2. 靶结构和材料特性

如弹体一样，任何被弹体所冲击的对象，都可以成为靶。

按照靶厚薄程度常分为半无限靶、厚靶、中厚靶和薄靶，其特点：

半无限靶：在弹体侵彻过程中，不存在背面和侧面边界的影响；

厚靶：弹体侵入靶板相当大的距离之后，才出现靶后背面边界的影响；

中厚靶：在弹体侵彻靶板的整个过程中，都存在靶背面边界的影响；

薄靶：弹体侵彻靶板过程中，在整个靶厚度上不存在应力梯度和变形梯度。

靶背面边界的影响也可以通过应力波传播的次数来表示。当应力波在弹体内来回传播一次时，靶板内应力波的传播次数用 n 表示，其值

$$n = \frac{c_t}{c_p} \frac{l}{b}$$

式中 c_t 、 c_p 分别为靶板和弹体内应力波传播速度， l 是弹体长度， b 是靶板厚度。当 $n > 5$ 时，称为薄靶，这个数字是根据弹头前方靶内应力逐渐取得稳定值而决定的；当 $1 < n < 5$ ，称为中厚靶，这时靶内应力受到背面反射应力波的影响，但未达到稳定状态；当 $n < 1$ 时，称为厚靶，此时靶中应力波从靶背面反射回来所需时间比弹体中应力波从弹底反射回来所需时间还要长，从而靶背面反射应力波影响不大。

靶材料的物理性能，如密度、硬度、屈服极限、强度极限对冲击效应都有明显的作用。按照材料密度大小可以分为轻材料、中等重材料和重材料，密度 $\rho < 3\text{g/cm}^3$ 的材料称为轻材料，如土壤、岩石、木材、陶瓷、轻金属； $3\text{g/cm}^3 < \rho < 10\text{g/cm}^3$ 的材料称为中重材料，许多常用金属如钢、铁、铜等属于此类； $\rho > 10\text{g/cm}^3$ 的材料称为重材料，这类材料主要指铅、钨、铀等重金属。靶材料也可以按抵抗弹体侵入的能力分成低阻抗靶、中阻抗靶和高阻抗靶，低阻抗材料主要指土壤，这类材料疏松多孔，多为颗粒状，在很大程度上存在不均匀性和各向异性；中阻抗材料包括混凝土、砖石、低强度金属等，这种材料多为混合物，均匀