

普通高等教育
兵工类规划教材

火药燃烧理论

王伯羲 冯增国 杨荣杰 编著



北京理工大学出版社

TQ560.1

W-166

火药燃烧理论

王伯羲 冯增国 杨荣杰 编著

北京理工大学出版社

874361

内 容 简 介

本书是全国高等学校兵工类专业统编火药系列教材之一。本书着重阐述火药的稳态燃烧特性和理论。全书共分11章,第1章绪论介绍了包括火药在内的燃烧科学和理论的发展,并对有关稳态燃烧的基本问题进行了概述。第2至第5章是有关输运和流体力学、化学反应动力学的基础知识。第6章至第11章分别讨论了火药的点火、稳态燃烧特性、稳态燃烧理论、热分解及燃烧特性的调节。

本书兼顾理论和实践,力求比较系统地反映国内外火药稳态燃烧研究的先进技术和研究成果。本书是火药(或固体推进剂)专业的研究生教材,也可作为相关专业本科生和从事火药研究与制造的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火药燃烧理论/王伯羲等编著. —北京:北京理工大学出版社,1997. 12

ISBN 7-81045-354-8

I. 火… II. 王… III. 发射药-燃烧-理论-高等学校-教材 IV. TQ562

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第22795号

责任印制:刘季昌 责任校对:陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码100081 电话(010)68912824

各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷



787×1092毫米 16开本 24.75印张 610千字

1997年12月第1版 1997年12月第1次印刷

印数:1—800册 定价:29.50元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

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、促进教学改革及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、逐步更新及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、制定质量标准及明确岗位职责、制定了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件，根据兵工类专业的特点，成立了十个专业教学指导委员会，以更好地编制兵工类专业教材建设规划，加强对教材的评审和研究工作。

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，力求系列配套，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对兵工专业教材的系列配套，对提高教学质量和培养国防现代化人才，对促进兵工类专业科学技术的发展，起到积极的作用。

本教材由王新华教授主审，经中国兵器工业总公司火炸药专业教学指导委员会复查，兵总教材编审室孙业斌教授审定。

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

1994年11月

火药系列教材

火药燃烧理论

火药系列教材编审委员会：

主任委员：王泽山

常务副主任委员：孙业斌

副主任委员：张端庆 戴健吾 牛秉彝 刘继华

委 员：（按姓氏笔划）

王泽山	牛秉彝	白木兰	刘继华	孙业斌
肖学忠	罗秉和	陆安舫	赵子立	张端庆
徐复铭	徐德平	谭惠民	戴健吾	

火药系列教材目录

序号	教材名称	主编人
1	火炮与火箭装药内弹道原理	张柏生
2	火药装药设计原理	王泽山
3	火药用原材料性能与制备	张端庆
4	火药实验方法	王泽山
5	火药设计原理	黄人骏
6	火药物理化学性能	刘继华
7	单基与多基火药	胡国胜
8	双基火药	张续柱
9	复合火药	马庆云
10	火药燃烧理论	王伯羲

火药系列教材总序

“火药系列教材”就要问世了，我们谨以这套教材献给我国火药行业的全体同仁，希望它为发展我国火药科学技术、为培养火药专业后继人才做出贡献。

常期以来，火药不仅在军事上用于枪炮弹丸的发射和火箭导弹的推进，而且在民用方面也有着广泛的用途。火药（后来叫黑火药）是我国古代四大发明之一，公元3世纪我国古代劳动人民就发现了火药的燃烧性质，公元10世纪火药用于军事，此后中国出现了多种火药兵器。公元13世纪，火药才传入阿拉伯国家，进而传入欧洲，得到了广泛的应用。恩格斯曾提到中国的黑火药打破了欧洲16世纪的城堡，直到19世纪末，黑火药一直是各种枪炮和火箭的唯一发射能源，它对军事技术、人类文明及社会进步都产生了深远的影响。近代火药的制造始于19世纪初，1833年法国人布拉科诺（Braconnot）首先制出了硝化纤维素，为火药的革新打开了大门。1865年英国化学家阿贝尔F.A.（Abel F.A.）用细断法制得了安定的硝化纤维素，直到1884年法国化学家维也里P.（Vieille P.）用醇醚混合溶剂处理硝化纤维素，解决了它的密实成型问题，发明了单基火药。由于它燃烧时无烟且威力比黑火药大，从而取代了黑火药作为发射药的地位。1847年意大利人索布雷罗（Sobrero）制造出硝化甘油。1862年瑞典化学家诺贝尔A.B.（Nobel A.B.）开设了第一个硝化甘油工厂，1888年他用低氮量硝化纤维素和硝化甘油发明了巴力斯太型双基火药，为近代火药增加了新品种。第二次世界大战期间，为了满足大口径炮弹、大型火箭及形状复杂的发射装药要求，1937年在德国出现了三基药。1942年美国又研制出了一系列的复合火药，本世纪60年代又出现了高能量、高燃速以及力学性能和工艺性能良好的火药，明显地提高了推进火箭用的火药性能，与此同时，又加强了用于推进弹丸的装药研究。近年来，世界各国继续进行新火药和火药装药研究，也开展了改善单项性能指标的研究，研制适应不同武器要求的特种性能火药。例如研制高能低烧蚀发射药、高能高强度发射药、高能无烟推进剂、高能平台推进剂、高燃速推进剂及低燃速推进剂等，并以提高火药生存能力为重点，发展低易损性火药。

解放前，我国的火药工业发展缓慢，自1895年上海建立第一所单基无烟药厂后，到1945年才建立第一所双基火药厂。

建国以来，我国的火药工业与火药科学技术随着国民经济的迅猛发展，从仿制到自行设计，有了长足发展。我国研制的火药已有很多品种接近或赶上世界先进水平。但就火药学科总体而言，我国还落后于经济发达国家。为了使我国火药科学技术进一步发展，尽快缩小与先进国家的差距，达到国际水平，我们非常需要培养一支掌握现代火药知识且结构合理的技术队伍。这是振兴我国火炸药行业的百年大计，这套火药系列教材就是为了实现这一目的而编写的。另外，我国有一大批在火药园地上辛勤耕耘了几十年的专家，他们在长期的教学、科研和生产中，取得了丰硕的成果并积累了极其丰富的经验，这是我国火药行业非常宝贵的财富。现在这些专家大多年事已高，非常希望把他们多年积累的知识传给后人，进而发扬光大。这套“火药系列教材”也是为了实现专家们的这一心愿及为祖国留下这一宝贵财富而编写的。

“火药系列教材”共10本，包括火药原材料、设计理论、燃烧理论、生产工艺、应用技

术、实验与性能以及安全技术等各个方面内容，取材适当、重点突出、符合专业教学大纲要求。既反映现代火药科学技术水平及最新成果，又结合我国火药科研、生产现状及编著者本人多年积累的教学、科研经验。与国内已出版的同类专著和教材相比，内容有较大幅度的翻新，有一部分教材则系国内首次公开出版。本系列教材全面采用国家法定计量单位，贯彻执行国家现行标准，读后将令人有耳目一新之感。

本系列各门教材均聘请实际经验丰富、学术造诣较深的教授和副教授担任主编，编写大纲于1988年5月经专家审定后，教材的初稿又通过火药系列教材编审委员会初审和专家主审，最后由“兵总”教材编审室审定定稿。

“火药系列教材”的出版，归功于各编者数年来锲而不舍的辛勤劳动，归功于编审委员会各位专家的热情指导，归功于“兵总”教材编审室的积极倡导与卓有成效的努力工作，归功于中国兵器工业总公司教育局及有关领导的关心和支持，还归功于北京理工大学出版社和有关院校印刷厂的鼎力协助，我们对此深表感谢！

为了国防科学技术的现代化，我们期待所有的火药工作者，努力贡献自己的劳动和智慧，攀登火药科学的新高峰！

在我国编写“火药系列教材”尚属首次，限于水平，教材中的缺点、错误或不尽人意之处在所难免，我们热切希望读者不吝赐教。

“火药系列教材”编审委员会

王泽山 孙业斌

1993.2

前 言

火药是火炮发射药和火箭固体推进剂的总称，它是战术、战略武器以及宇航运载火箭等推进系统的一种主要能源，因此可称为火炮和火箭系统的“心脏”。火药的燃烧性能直接决定着被推进（或发射）系统的性能好坏，而它的燃烧又与其它燃料的燃烧有着许多显著的不同特点。因此，火药的燃烧已形成一个专门的研究领域，越来越受到人们的重视。国际上已发表了大量关于火药燃烧的研究论文，近年来，逐步形成专门的学科，不少学者，已从学科发展的角度编著了不少包括火药燃烧内容在内的火药专著。本书则更集中于火药稳态燃烧理论和实践的范畴。

本书参考和归纳了国内外有关专著及大量文献资料。内容兼顾理论和实践两个方面，并注意理论联系实际。在理论研究方面着重介绍基本概念、基本方法、主要结论及应用范围，重点介绍了双基和复合火药稳态燃烧的物理模型和数学模型，对其它类型火药燃烧机理，多孔火药及催化燃烧机理也给予了相应的描述，并介绍了相关的基础理论知识。对数学公式尽量避免繁琐的推导，力求简明扼要；在实验研究方面介绍了各类火药在燃烧特性方面所获得的规律及结论，特别是对目前调节火药燃烧性能应用较多的催化剂种类、催化规律等进行了较为详实和系统的总结，还对实验研究方法和测试技术给予了重视，除了比较详细的归纳前人用过的实验方法，还介绍了一些新的研究途径和测试技术。本书力求比较系统地反映国内外火药稳态燃烧研究的先进技术和研究成果。

本书由王伯羲任主编，并编写第1，7，9，10，11章；由冯增国编写第4、5、6、8章；由杨荣杰编写第2、3章。本书第1、7、9、10、11章的文稿计算机输入和初校由施小明完成，第4、5、6、8章的文稿初校和资料整理由朱赛霓完成。白木兰为本书写了编写大纲，并提供了部分参考资料。本书承蒙王新华教授主审；王泽山，牛秉彝、戴健吾，刘继华，孙业斌审定。在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平和经验，书中缺点错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1996. 7.

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 燃烧科学与燃烧理论	(1)
1.1.1 燃烧的一般概念	(1)
1.1.2 爆炸物质的燃烧、爆炸与爆轰	(1)
1.1.3 燃烧科学与理论的发展	(2)
1.2 燃烧科学的研究内容和基本方法	(9)
1.2.1 燃烧科学的研究内容	(9)
1.2.2 燃烧理论研究的基本方法	(9)
1.3 火焰和具有化学反应的流动	(10)
1.3.1 火焰的一般概念	(10)
1.3.2 具有化学反应的流动	(11)
1.4 着火、熄火和火焰稳定传播	(12)
1.4.1 着火	(12)
1.4.2 熄火	(14)
1.4.3 火焰稳定传播	(15)
1.5 固体火箭发动机对火药燃烧性能的要求	(16)
1.5.1 火药在发动机中的燃烧过程	(16)
1.5.2 火箭发动机对火药燃烧性能的要求	(17)
1.6 内容简介及学习中所应注意的问题	(18)
参考文献	(18)

第 2 章 多元体系反应流体的基本方程

2.1 多元体系的基本关系式	(20)
2.1.1 多元体系及各组分的基本关系式	(20)
2.1.2 体系和组分相对静止坐标系的物质流	(21)
2.2 基本守恒方程	(22)
2.2.1 连续方程(总质量守恒方程)	(22)
2.2.2 组分质量守恒方程(扩散方程)	(23)
2.2.3 动量守恒方程	(25)
2.2.4 能量守恒方程	(32)
2.2.5 守恒方程的简化与转换	(38)
参考文献	(43)

第 3 章 多元流动体系的传递过程基础

3.1 多元气体的流动	(44)
3.1.1 牛顿粘性定律	(44)
3.1.2 层流流动	(46)

3.1.3 湍流流动	(48)
3.1.4 边界层理论	(53)
3.2 传热基本方程	(61)
3.2.1 热传导	(61)
3.2.2 对流传热	(63)
3.2.3 辐射传热	(68)
3.3 扩散过程	(74)
3.3.1 分子扩散	(75)
3.3.2 等分子反向扩散	(77)
3.3.3 某组分分子通过另一停滞组分的扩散	(78)
3.3.4 扩散系数	(78)
3.3.5 对流传质	(81)
附表 1	(88)
附表 2	(89)
参考文献	(90)

第 4 章 化学反应动力学基础

4.1 简单反应动力学基础	(91)
4.1.1 基本概念和定律	(91)
4.1.2 浓度的影响及反应机理	(94)
4.1.3 温度的影响及反应速度理论	(97)
4.1.4 压力对反应速度的影响	(101)
4.2 催化反应动力学基础	(102)
4.2.1 催化剂的特性、作用和选择性	(102)
4.2.2 均相催化反应	(104)
4.2.3 复相催化反应	(105)
4.2.4 催化剂的活性及影响因素	(108)
4.3 链反应	(109)
4.3.1 直链反应	(109)
4.3.2 支链反应	(111)
4.3.3 退化支链反应	(112)
4.4 自动催化反应	(113)
参考文献	(114)

第 5 章 火焰传播理论

5.1 预混气体燃烧	(115)
5.1.1 预混气体层流燃烧理论	(115)
5.1.2 预混气体的湍流燃烧理论	(122)
5.2 扩散火焰	(124)
参考文献	(125)

第 6 章 固体推进剂点火和火焰传播

6.1 热自燃	(126)
----------------	-------

6.1.1 类型与机理	(127)
6.1.2 封闭体系的热自燃	(128)
6.1.3 实验方法	(130)
6.2 固体推进剂点火	(131)
6.2.1 点火源	(132)
6.2.2 点火理论	(134)
6.2.3 影响点火的因素	(136)
6.2.4 固体火箭发动机中的点火问题	(139)
6.2.5 沿固体推进剂表面的火焰传播	(140)
6.2.6 点火火焰向推进剂裂缝和空隙中传播	(142)
参考文献	(143)

第 7 章 固体推进剂稳态燃烧特性

7.1 固体推进剂燃烧波结构	(145)
7.1.1 固体推进剂燃烧波结构的特点	(145)
7.1.2 燃烧化学反应动力学	(150)
7.1.3 燃烧过程的物理变化	(157)
7.2 燃烧波特性	(164)
7.2.1 燃烧波结构参数对燃烧性能的影响	(164)
7.2.2 燃烧波结构的测试方法	(171)
7.2.3 影响燃烧波结构的因素	(178)
7.3 固体推进剂的燃烧速度	(182)
7.3.1 推进剂的燃烧速度及测试方法	(182)
7.3.2 压力对燃速的影响	(187)
7.3.3 初温对燃速的影响	(188)
7.4 推进剂化学组成对燃速的影响	(190)
7.4.1 粘结剂对燃速的影响	(190)
7.4.2 氧化剂类型及含量对燃速的影响	(192)
7.4.3 氧化剂粒度及其分布对燃速的影响	(197)
7.4.4 燃烧催化剂对燃速的影响	(200)
7.4.5 金属粉对燃速的影响	(202)
7.4.6 增塑剂对燃速的影响	(204)
7.5 推进剂物理结构对燃速的影响	(204)
7.5.1 推进剂的密度及结构对燃速的影响	(204)
7.5.2 组分含有微孔对燃速的影响	(204)
7.5.3 推进剂微孔结构对燃速的影响	(206)
7.5.4 金属丝对燃速的影响	(206)
参考文献	(207)

第 8 章 固体推进剂稳态燃烧理论

8.1 双基推进剂稳态燃烧理论	(211)
------------------------	-------

8.1.1	赖斯-吉奈尔模型	(212)
8.1.2	库恩模型	(214)
8.1.3	BDP 单元推进剂模型	(218)
8.1.4	维留诺夫模型	(220)
8.1.5	久保田双基稳燃模型	(222)
8.2	复合推进剂燃烧理论	(226)
8.2.1	粒状扩散火焰模型 (GDF)	(226)
8.2.2	方阵火焰模型	(229)
8.2.3	BDP 多层火焰燃烧模型	(231)
8.2.4	双火焰模型	(234)
8.3	复合改性双基推进剂燃烧理论	(237)
8.3.1	AP-CMDB 推进剂稳态燃烧模型	(237)
8.3.2	HMX-CMDB 推进剂稳态燃烧模型	(238)
8.4	计算燃烧学简单介绍	(238)
	参考文献	(240)

第 9 章 超高燃速推进剂对流燃烧特性和理论

9.1	稳态燃烧与爆轰的瑞利-雨果尼奥关系	(241)
9.1.1	C-J 爆轰理论的基本观点	(241)
9.1.2	气体爆轰参数方程	(242)
9.1.3	瑞利-雨果尼奥稳定传播速度禁区的突破	(244)
9.2	超高燃速推进剂的对流燃烧特性	(246)
9.2.1	UHBR 的类型	(246)
9.2.2	UHBR 的燃烧特性	(248)
9.2.3	影响 UHBR 燃烧特性的因素	(254)
9.3	超高燃速推进剂的测试方法	(257)
9.3.1	UHBR 超高燃速的测试方法	(257)
9.3.2	UHBR 药柱微孔结构的测试方法	(259)
9.4	超高燃速推进剂对流燃烧理论	(260)
9.4.1	颗粒填充床对流燃烧理论	(260)
9.4.2	两相流对流燃烧模型	(268)
9.4.3	推力对流燃烧模型	(271)
9.4.4	扰动对流燃烧模型	(273)
9.4.5	微孔统计对流燃烧模型	(275)
	参考文献	(279)

第 10 章 固体推进剂热分解

10.1	固体推进剂热分解与燃烧特性的关系	(281)
10.1.1	AP 复合推进剂热分解与燃烧特性的关系	(281)
10.1.2	硝酸推进剂热分解特性与其燃速的关系	(284)
10.2	研究推进剂热分解的方法	(285)
10.2.1	热分析法	(285)

10.2.2	高速分解测试法	(289)
10.2.3	其它方法	(293)
10.3	各组元的热分解	(296)
10.3.1	硝化棉热分解	(296)
10.3.2	硝化甘油的热分解	(302)
10.3.3	高氯酸铵的热分解	(304)
10.3.4	黑索今的热分解	(309)
10.3.5	奥克托今的热分解	(314)
10.3.6	各种主要粘结剂的热分解	(318)
10.4	固体推进剂的热分解	(319)
10.4.1	均质推进剂的热分解	(319)
10.4.2	复合推进剂的热分解	(321)
	参考文献	(323)

第 11 章 固体推进剂燃烧性质的调节

11.1	调节固体推进剂燃烧性能的重要性	(326)
11.2	提高燃速和降低压力指数的几种途径	(327)
11.2.1	提高燃速的有效途径	(327)
11.2.2	降低燃速压力指数的有效途径	(335)
11.3	燃烧催化剂	(339)
11.3.1	均质推进剂用催化剂	(340)
11.3.2	复合推进剂用催化剂	(346)
11.3.3	硝胺-无(少)烟推进剂用催化剂	(357)
11.4	催化剂的选择原则及催化机理	(363)
11.4.1	催化剂的选择性和适应性原则	(363)
11.4.2	催化剂的气相催化机理	(370)
11.4.3	催化剂的凝聚相催化机理	(372)
11.4.4	气—固型催化机理	(374)
	参考文献	(378)

第 1 章 绪 论

1.1 燃烧科学与燃烧理论

1.1.1 燃烧的一般概念

人们通常把燃烧的表现现象称为火。火对于人类已经习以为常，它的使用至少也有 50 万年的历史了。随着科学技术的进步，尽管人们对燃烧技术的掌握与应用已有了相当高的水平（如喷气发动机中的燃烧，沸腾床燃烧，火箭发动机中的燃烧等），但由于燃烧是一个包括热量传递、动量传递、质量传递和高速化学反应的综合物理化学过程，因此至今我们对燃烧的认识还很不完善。现在，通常把一切强烈放热的、伴随有光辐射的快速化学反应过程都称为燃烧。在有两种组分参加的燃烧反应中，把放出活泼氧原子（或类似的原子）的物质称为氧化剂，而被氧化剂氧化的另一类组分就称为燃料。如氧、双氧水、高锰酸钾等是氧化剂，氢、酒精、汽油、木炭等是燃料。火药的燃烧则是集氧化剂和燃料于一体的特殊物质的燃烧，其燃烧过程还伴随生成大量的气体和释放大量的热。火药的燃烧一般是有规律的，通常是逐层燃烧，即所谓平行层燃烧。燃烧过程都要经过热分解、预混合、扩散等中间阶段才能转变成燃烧的最终产物。由于火药是多组分的混合物，燃烧过程存在着更为复杂的传热、传质和传动量的物理过程和激烈的化学反应过程。

1.1.2 爆炸物质的燃烧、爆炸与爆轰

爆炸物质的燃烧、爆炸与爆轰都是一种猛烈的高速变化的物理和化学过程，在这些过程中都包含着能量极迅速的释放，能量和物质的传递以及高速进行的化学反应。但彼此间又有着明显的区别。同一种物质在一定的条件下可以表现为燃烧，而在另一条件下则可表现为爆炸或爆轰。

1. 爆炸物质的燃烧

爆炸物质的燃烧，其特点是反应只在爆炸物的局部区域（通常叫反应区）内进行。燃烧波的传播是化学反应区的能量通过热传导，辐射和对流及燃烧气态产物的扩散作用传给未反应的爆炸物的。燃烧波的传播速度相对较慢，一般在每秒几毫米至数百米之间。远低于在爆炸物中的声速。燃烧波的传播方向是与燃烧气态产物移动方向相反的。在波阵面处的压力相对较低，一般都在 100 MPa 以下。因此燃烧波的波形主要表现为膨胀波，在特定情况下也可伴有压缩波。另外燃烧波受外界环境条件（如：压力、温度等）的影响较大。爆炸物的燃烧还可分为平行层燃烧和对流燃烧。二者的区别在于平行层燃烧的固相反应区很薄，基本上是在固相表面反应，然后一层一层向未燃区传播；其燃速较低，一般在每秒数百毫米以下，并且传播速度易于稳定；能量传递主要表现为热传导和辐射以及气态产物的扩散；波形为单纯的膨胀波。而对流燃烧则是燃烧气态产物部分透入固相内，因此有一个相对较厚（厚度可达厘米量级）的固相层在同时进行燃烧反应，然后向未燃区传播。其燃速较快，一般在每秒数

百毫米至数百米，并且传播速度较平行层燃烧难于稳定；受外界条件特别是受压力的影响比平行层燃烧大；能量传递以对流和气态产物的扩散为主；气态产物传播方向则有一部分与燃烧波传播方向相同；而波形为膨胀—压缩波。

2. 爆炸物质的爆炸与爆轰

爆炸现象是指一种物理或化学的能量极为迅速地释放过程，在此过程中，系统的内在势能转为机械功及光和热的辐射。爆炸大致可分为物理爆炸、化学爆炸和核子爆炸三类。爆炸物质的爆炸是由物质化学结构发生急剧变化而引起的爆炸现象，是属于化学爆炸。爆炸与爆轰是属于同一范畴的概念。爆轰可分为稳定爆轰和不稳定爆轰，而传播速度不稳定的爆轰即称为爆炸。爆炸物的爆轰过程在开始阶段爆速是变化的，经过一段时间达最大值，然后稳定传播下去。爆轰是以爆轰波的形式沿爆炸物自行高速传播。传播速度在每秒数千米至一万米，大于在爆炸物中的声速。并且爆轰的传播速度恒定，其中爆炸的传播速度在每秒一千米左右，其爆速不稳定。爆轰的传播机理是借助于冲击波对未反应的爆炸物强烈地冲击压缩作用（爆轰波就是伴有高速化学反应的冲击波）。爆炸点附近发生压力骤增，可达数万兆帕斯卡。无论是否在密闭容器中，爆轰产物都急剧冲击周围介质，从而导致爆炸点附近物体的碎裂和变形。爆轰时产物移动方向与爆轰波传播的方向相同。爆炸过程受环境因素影响就很小，爆轰过程更是基本不受环境条件的影响。

1.1.3 燃烧科学与理论的发展

1. 一般燃烧科学与理论的发展

燃烧的应用和发展已有悠久的历史。在我国远古时期就有关于燧人氏钻木取火的传说，在欧洲也有关于普罗米修斯取火给人间的神话。从各种考古发掘也直接或间接地表明，人类祖先远在无文字可考的旧石器时代就已开始了使用火，火是人类第一次控制的自然力。恩格斯说过：“只是人类学会了摩擦取火之后，人才第一次使某种无生命的自然力为自己服务”。火的使用使人类脱离了茹毛饮血的野蛮状态而进入文明时代。但是，只有当火的使用由生活的领域进入到生产领域之后，燃烧才形成一门独立的科学和技术，并有了迅速的发展。人类所经历的每一次技术进步，如陶器制作、青铜冶炼、炼铁及冶金技术的发展、蒸气动力、煤和石油的使用、热能工程、火药、火箭、喷气及宇航技术的发展等等都与燃烧有着密切的关系，同时也大大推动了燃烧科学的发展。

古代人们在使用火的同时，产生过不少有关火的学说。如我国“五行说”的“金、木、水、火、土”中的火；古印度“四大说”的“地、水、火、风”中的火；古希腊“四元说”的“水、土、火、气”中的火等，都认为火是构成万物的原本物质之一。随着工业的发展，特别是冶金和化工工业的发展，应用燃烧的范围和规模扩大了，使人们更迫切地要想搞清燃烧现象的本质。但由于燃烧过程的复杂性，实质上直到18世纪中叶之前，人们对燃烧现象的本质几乎仍然毫无所知。在17世纪中到18世纪中，即自法国化学家拉瓦锡提出燃烧的氧化学说之前的大约100年间，欧洲曾流传着“燃素说”，并占统治地位。按燃素说，火是由无数细小而活泼的微粒构成的物质实体。这种火的微粒即能同其它元素结合而形成化合物，也能以游离方式存在。它弥散于大气之中，给人以热的感觉。“火微粒”所构成的元素就是“燃素”。按照燃素说解释燃烧现象，认为一切与燃烧有关的化学变化都可以归结为物质吸收燃素与释放燃素的过程。认为物质中含燃素越多，燃烧起来越旺。

直到 18 世纪，由于氧气以及其它碳酸气、氢气、氮气等一些重要气体的发现，促使了燃烧学的发展。到 1756 年至 1777 年间，罗蒙诺索夫和拉瓦锡通过各自的实验观察，完全否认了燃素说的结论，提出了燃烧的氧化学说，认为可燃物的燃烧并不是物质释放出燃素，而是可燃物与氧的化合反应。燃烧的氧化学说认为：燃烧能放出光和热，可燃物只有在氧存在时才能燃烧；空气主要由氮和氧气组成。

到 19 世纪汉斯 (Hess) 和基科夫 (Kirchoff) 等人发展了热化学和化学热力学，此时对燃烧过程进行了静态研究，把燃烧过程作为热力学体系考察其初态、终态间的关系，阐明了燃烧热、产物平衡组分及绝热燃烧温度的规律性。到 20 世纪 30 年代，开始建立研究燃烧动态过程的理论，莱文斯 (Lewis B)，艾里伯 (Elbe Von) 等人提出了燃烧反应动力学的链式反应机理，他们发展了 19 世纪玛拉德 (Mallard) 等提出的火焰传播概念，并提出了最小点火能量等基本概念，奠定了描述火焰的物理基础。接下来，苏联谢苗诺夫、泽尔多维奇等人从反应动力学和传热传质相互作用的观点，首次从定量关系上建立了着火及火焰传播的经典燃烧理论。从实践中人们逐渐认识到，限制和控制燃烧过程的因素往往不是反应动力学因素，而是传热、传质等物理因素。50 年代和 60 年代冯·克曼 (Karman Von) 首先提出用连续介质力学来研究燃烧基本现象，逐渐发展成反应流体力学。这一阶段虽然建立了化学流体力学基本方程组，但由于方程数目多、耦合和非线性，只有经过大量简化才可能求解。这使得人们无法通过将解与实验对照来检验理论，因为难以区分这种解的误差是来源于基本理论还是来源于人为的假设，也使燃烧学长期停留在分类综合实验现象和孤立地进行分析的阶段。

计算机的出现和发展，促进了燃烧学与数值计算方法的结合。20 世纪 60 年代后期，斯帕尔丁 (Spalding D B) 等人比较系统地把计算流体力学的方法用于燃烧研究，建立了燃烧的数学模型方法和数值计算方法。首先得到了边界层燃烧问题的数值解。接着，斯帕尔丁和哈劳 (Harlow F H) 建立了“湍流模型方法”，提出了一系列的湍流模型和湍流燃烧模型，发展了各具特色的数值计算方法和计算机程序体系。近 30 年来，英、美、法、德、苏、波、日和埃及等国相继开展了燃烧过程数值计算的研究工作。在基本方程、理论模型、数值方法和计算机程序等方面均取得了较大的进展，已发展到有可能对大型煤粉锅炉、燃气轮机燃烧室、内燃机、火箭发动机、核反应堆蒸气发生器和弹膛等系统中的三维、定常或非定常、均相或多相、湍流、有或没有化学反应的实际过程进行数值分析，给出参数的分布及其变化，预测装置的性能。这一新领域的出现，极大地丰富了燃烧学的内容，并逐渐形成了计算燃烧学这一分支学科。另外，随着燃烧实验技术，特别是激光诊断技术的发展，使人们有可能用非接触法来测量燃烧过程的气体流速，温度分布场，组分质量分布场，以及颗粒的运动速度、浓度和大小分布等。这些都为燃烧科学和理论的进一步发展奠定了良好的基础。

2. 火药燃烧科学与理论的发展

火药是用于火炮的发射药和用于火箭的固体推进剂的总称。火药燃烧科学与理论的发展同样是随着火药的发明和使用过程而发展的。并与一般燃烧科学和技术的发展有着密切的关系。火药是中国的四大发明之一，到公元八、九世纪，作为黑火药主要成分的确石随着中国的炼丹术开始传入回教国家，被阿拉伯人称为“中国雪”，被波斯人称为“中国盐”。但是直到 13 世纪，硝石才被阿拉伯人用于燃烧方面。13 世纪以前黑火药主要用于燃烧器械和破坏器械。从 13 世纪到 18 世纪的五个世纪中，黑火药的应用有了很大的发展。开始将黑火药制成粒状，并广泛地作火炮和枪械的发射药。但有烟火药仍是唯一的爆发物质，在军事上用作炸