




普通高等教育“十二五”规划教材



燃烧与爆炸学

郝建斌 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

燃烧与爆炸学

郝建斌 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书从化学动力学基础、物理学基本方程、着火理论、可燃气体的燃烧与爆炸、可燃液体的燃烧、可燃固体的燃烧、粉尘爆炸、炸药爆炸、蒸气爆炸9个方面对燃烧与爆炸理论进行了全面系统的阐述。

本书主要作为高等院校安全工程及相关专业的本科教材使用,同时可供相关科技领域的专业技术人员、安全科研人员与安全管理人员参考查阅。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧与爆炸学 / 郝建斌主编. —北京: 中国石化出版社, 2012. 6
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-1554-7

I. ①燃… II. ①郝… III. ①燃烧学 - 高等学校 - 教材 ②爆炸 - 理论 - 高等学校 - 教材 IV. ①0643. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108352 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 12.5 印张 307 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

定价:32.00 元

前 言

火灾与爆炸是人类社会生产、生活中常见的事故灾害类型。燃烧与爆炸理论是安全科学与工程学科的重要基础，研究燃烧与爆炸理论和过程，对预防火灾和爆炸事故具有十分重要的意义。燃烧和爆炸既有区别，又有联系。对于安全工程专业，燃烧和爆炸理论是必须掌握的基础理论知识，将燃烧理论和爆炸、爆轰基本规律作为一门课程是较为合理的。作者一直从事燃烧与爆炸学的教学工作，在教学过程中，对教材的选择颇为困难；经过多年的教学积累和总结，编写了这本教材，旨在为高等院校安全工程及相关专业提供系统性较强的教学用书。同时该书还可供相关科技领域的专业技术人员、安全科研人员与安全管理人员参考查阅。

本书共分9章，从化学动力学基础、燃烧物理学基本方程、着火理论、可燃气体的燃烧与爆炸、可燃液体的燃烧、可燃固体的燃烧、粉尘爆炸、炸药爆炸、蒸气爆炸9个方面进行了阐述。为便于学生课后复习，本书增加了课后习题。

本书由长安大学郝建斌组织编写并负责统稿，由郝建斌、李金和、王洪胜共同编写。本书编写过程中，参考了大量国内外同行发表的相关论著，在此，向他们表示衷心的感谢。同时，也特别感谢西安科技大学李树刚教授、长安大学门玉明教授的指导和帮助。

由于作者水平有限，书中难免存在一些疏漏与不足，恳请指正。

目 录

1 化学动力学基础	(1)
1.1 燃烧与爆炸的本质和条件	(1)
1.1.1 燃烧的本质	(1)
1.1.2 燃烧的条件	(1)
1.1.3 爆炸及其特征	(2)
1.1.4 爆炸的分类	(3)
1.1.5 爆炸发生的条件	(4)
1.1.6 燃烧与化学性爆炸的转化	(6)
1.2 化学反应速率	(7)
1.2.1 反应速率的基本概念	(7)
1.2.2 质量作用定律	(8)
1.2.3 阿累尼乌斯定律	(8)
1.2.4 燃烧反应速率方程	(9)
1.2.5 各种参数对化学反应速率的影响	(11)
1.3 链式反应	(12)
1.3.1 链式反应的步骤	(12)
1.3.2 直链反应	(13)
1.3.3 支链反应	(14)
1.4 燃烧的有关计算	(15)
1.4.1 燃烧时空气需要量计算	(15)
1.4.2 燃烧产物及其计算	(18)
1.4.3 燃烧热及燃烧温度的计算	(22)
课后习题	(29)
2 燃烧物理学基本方程	(30)
2.1 多组分气体基本参量	(30)
2.2 费克扩散定律	(32)
2.3 牛顿黏性定律	(32)
2.4 傅里叶导热定律	(33)
2.5 牛顿冷却公式	(33)
2.6 热辐射基本定律	(33)
2.6.1 热辐射与吸收的概念	(33)
2.6.2 热辐射基本定律	(34)
课后习题	(36)

3 着火理论	(37)
3.1 谢苗诺夫热自燃理论	(37)
3.1.1 热自燃理论	(37)
3.1.2 临界着火条件的定量关系	(40)
3.1.3 着火感应期	(42)
3.2 链式反应着火理论	(43)
3.2.1 链式自燃着火条件	(44)
3.2.2 链式反应理论中的着火感应期	(46)
3.2.3 着火半岛现象	(46)
3.3 强迫着火	(47)
3.3.1 高温质点强迫着火的物理描述	(48)
3.3.2 常用点火方法	(49)
3.4 其他着火理论	(53)
3.4.1 分子碰撞着火理论	(53)
3.4.2 活化能理论	(53)
3.4.3 过氧化物理理论	(54)
课后习题	(55)
4 可燃气体的燃烧与爆炸	(56)
4.1 气体的燃烧形式	(56)
4.2 预混气中火焰的传播理论	(57)
4.2.1 物理模型与雨贡尼奥方程	(57)
4.2.2 正常火焰传播与爆轰	(58)
4.3 层流火焰传播速度及其传播机理	(59)
4.3.1 层流火焰传播机理概述	(59)
4.3.2 层流火焰传播速度——马兰特简化分析	(60)
4.3.3 影响火焰传播速度的因素	(61)
4.4 预混可燃气体中的湍流火焰传播	(64)
4.4.1 湍流燃烧的特点	(64)
4.4.2 湍流火焰传播理论	(65)
4.5 扩散燃烧基础	(68)
4.5.1 层流扩散燃烧火焰	(68)
4.5.2 湍流扩散燃烧火焰	(69)
4.6 气体爆炸特性	(70)
4.6.1 气体混合物爆炸	(70)
4.6.2 分解爆炸	(75)
4.7 爆炸极限理论及计算	(77)
4.7.1 爆炸浓度极限概念	(77)
4.7.2 爆炸极限的影响因素	(80)
4.7.3 三元组分爆炸范围图	(83)

4.7.4	可燃混气爆炸极限的经验公式	(84)
4.8	爆轰	(86)
4.8.1	爆轰的概念与成因	(86)
4.8.2	爆轰形成条件	(88)
4.8.3	爆轰波波速	(88)
4.8.4	影响爆轰传播的因素	(90)
4.8.5	爆轰波的破坏作用	(91)
4.9	气体爆炸特性参数测定方法	(93)
4.9.1	爆炸极限	(93)
4.9.2	最小点火能量	(94)
4.9.3	自燃温度	(94)
4.9.4	最大试验安全间隙	(95)
4.9.5	爆炸指数	(96)
	课后习题	(97)
5	可燃液体的燃烧	(98)
5.1	可燃液体的燃烧特点	(98)
5.2	液体的蒸发	(98)
5.2.1	蒸发过程	(98)
5.2.2	蒸气压	(98)
5.2.3	蒸发热	(100)
5.2.4	液体的沸点	(100)
5.3	闪点与爆炸温度极限	(100)
5.3.1	闪燃与闪点	(100)
5.3.2	同类液体闪点变化规律	(101)
5.3.3	混合液体闪点	(102)
5.3.4	闪点计算	(102)
5.3.5	爆炸温度极限	(105)
5.4	液体着火	(107)
5.4.1	液体引燃	(107)
5.4.2	液体的自燃	(109)
5.5	可燃液体的稳定燃烧	(112)
5.5.1	液体的燃烧速度	(112)
5.5.2	液体稳定燃烧的火焰特征	(115)
5.6	沸溢和喷溅	(118)
5.6.1	基本概念	(118)
5.6.2	单组分液体燃烧时热量在液层的传播特点	(118)
5.6.3	原油燃烧时热量在液层中的传播特点	(120)
5.6.4	重质油品的沸溢和喷溅	(120)

5.7	液滴的蒸发和燃烧	(121)
5.7.1	液滴蒸发的简单模型	(121)
5.7.2	液滴燃烧的简化模型	(122)
5.7.3	液雾(液滴群)的燃烧及火焰传播	(125)
	课后习题	(126)
6	可燃固体的燃烧	(127)
6.1	可燃固体的着火	(127)
6.1.1	可燃固体的燃烧特点	(127)
6.1.2	可燃固体的燃烧过程	(128)
6.2	可燃固体的燃烧形式	(129)
6.2.1	蒸发燃烧	(129)
6.2.2	表面燃烧	(129)
6.2.3	分解燃烧	(129)
6.2.4	阴燃	(130)
6.3	固体的燃烧速度	(131)
6.3.1	固体燃烧速度的表示方法	(131)
6.3.2	固体燃烧速度的主要影响因素	(132)
6.4	典型固体物质的燃烧	(134)
6.4.1	木材的燃烧	(134)
6.4.2	高聚物的燃烧	(135)
6.4.3	金属的燃烧	(138)
	课后习题	(139)
7	粉尘爆炸	(140)
7.1	粉尘爆炸基础知识	(140)
7.1.1	粉尘的分类	(140)
7.1.2	可燃粉尘的特性	(141)
7.1.3	常见的可燃粉尘	(142)
7.2	粉尘爆炸机理及过程描述	(144)
7.2.1	粉尘爆炸的条件	(144)
7.2.2	粉尘爆炸机理	(144)
7.2.3	爆炸发展过程	(145)
7.2.4	粉尘爆炸特性参数	(147)
7.3	粉尘爆炸特性参数测试方法及危险等级划分	(148)
7.3.1	粉尘爆炸特性参数测试方法	(148)
7.3.2	粉尘爆炸危险等级划分	(152)
7.4	粉尘爆炸的影响因素	(153)
7.4.1	粉尘的理化性能	(153)
7.4.2	外部条件	(155)
7.5	煤尘燃烧与爆炸	(157)

7.5.1	煤尘燃烧与爆炸的原因和过程	(158)
7.5.2	煤尘爆炸的必要条件	(158)
7.5.3	煤尘爆炸的主要特征及效应	(159)
7.5.4	影响煤尘爆炸的主要因素	(161)
	课后习题	(163)
8	炸药爆炸	(164)
8.1	炸药的种类及其主要化学变化	(164)
8.1.1	炸药的种类	(164)
8.1.2	炸药的主要化学变化形式	(166)
8.2	炸药的燃烧和爆轰	(166)
8.2.1	炸药的燃烧特点	(166)
8.2.2	炸药的爆轰	(167)
8.3	炸药的爆炸性能	(168)
8.3.1	炸药的敏感度	(168)
8.3.2	炸药的热化学参数	(170)
8.3.3	炸药的威力和猛度	(172)
8.3.4	炸药的氧平衡	(172)
8.4	炸药起爆机理	(173)
8.4.1	热起爆机理	(173)
8.4.2	机械起爆	(175)
8.4.3	冲击波起爆	(177)
8.5	化学爆炸时破坏能力的理论估算	(179)
8.5.1	化学爆炸时的作功能力与 TNT 当量的理论估算	(179)
8.5.2	化学爆炸时空气冲击波超压的理论估算	(180)
	课后习题	(181)
9	蒸气爆炸	(182)
9.1	液体沸腾	(182)
9.1.1	液体过热现象	(182)
9.1.2	各种沸腾现象	(184)
9.2	熔融物水蒸气爆炸	(185)
9.2.1	熔融金属水蒸气爆炸	(185)
9.2.2	熔融盐水蒸气爆炸	(186)
9.3	低温液化气蒸气爆炸	(187)
9.4	高压过热液体蒸气爆炸	(188)
	课后习题	(189)
	参考文献	(190)

1 化学动力学基础

1.1 燃烧与爆炸的本质和条件

燃烧和爆炸是一种快速化学反应，其结果则是化学能转变为热能(爆炸时，一部分转变为机械能)。掌握基础化学、热化学、化学动力学等知识对研究燃烧与爆炸起着重要作用。

1.1.1 燃烧的本质

所谓燃烧，就是指可燃物与氧化剂作用发生的放热反应，通常伴有火焰、发光和发烟的现象。燃烧区的温度很高，使其中白炽的固体粒子和某些不稳定(或受激发)的中间物质分子内电子发生能级跃迁，从而发出各种波长的光；发光的气相燃烧区就是火焰，它的存在是燃烧过程中最明显的标志；由于燃烧不完全等原因，会使产物中混有一些微小颗粒，这样就形成了烟。

从本质上说，燃烧是一种氧化还原反应，但其放热、发光、发烟、伴有火焰等基本特征表明它不同于一般的氧化还原反应。例如氢气在氯气中燃烧，氯原子得到一个电子被还原，而氢原子失去一个电子被氧化。在这个反应中，虽然没有氧参与反应，但所发生的是一个激烈的氧化还原反应，并伴随有光和热的发生，这个反应也是燃烧。

电灯在照明时放出光和热，但未发生化学反应，不能称为燃烧。铜与稀硝酸反应，虽然有电子得失，但不产生光和热，也不能称为燃烧。综上所述，燃烧过程具有两个特征：(1)有新的物质产生(即燃烧是化学反应)；(2)伴随着发光放热现象。

1.1.2 燃烧的条件

燃烧现象十分普遍，但其发生必须具备一定的条件。作为一种特殊的氧化还原反应，燃烧反应必须有氧化剂和还原剂参加，此外还要有引发燃烧的能源。

① 可燃物 无论是气体、液体、固体，还是金属、非金属、无机物、有机物，凡是能与空气中的氧或其他氧化剂起燃烧反应的物质，均称为可燃物，如氢气、乙炔、酒精、汽油、木材、纸张等。

② 助燃物 凡是与可燃物结合能导致和支持燃烧的物质，都叫做助燃物，如空气、氧气、氯气、氯酸钾、过氧化钠等。空气是最常见的助燃物，本书中如无特别说明，可燃物的燃烧都是指在空气中进行的。

③ 点火源 凡是能引起物质燃烧的点燃能源，统称为点火源，如明火、高温表面、摩擦与冲击、自发热、化学反应热、电火花、光热射线等。

上述三个条件通常被称为燃烧三要素。但是即使具备了三要素并且相互结合、相互作用，燃烧也不一定发生。要发生燃烧还必须满足其他条件，如可燃物和助燃物要有一定的数量和浓度，点火源要有一定的温度和足够的能量等。燃烧能发生时，三要素可表示为封闭的

三角形，通常称为着火三角形，如图 1-1(a)所示。

经典的着火三角形一般足以说明燃烧得以发生和持续进行的原理。但是，根据燃烧的链式反应理论，很多燃烧的发生都有持续的游离基(自由基)作“中间体”，因此，着火三角形应扩大到包括一个说明游离基参加燃烧反应的附加维，从而形成一个着火四面体，如图 1-1(b)所示。

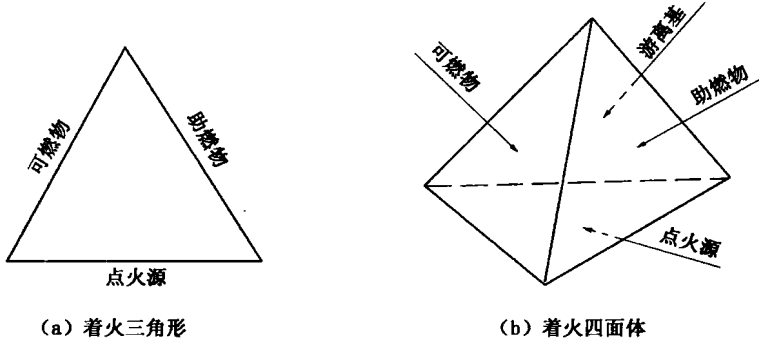


图 1-1 着火三角形和着火四面体

1.1.3 爆炸及其特征

1.1.3.1 爆炸

爆炸是指物质从一种状态，经过物理变化或化学变化，突然变成另一种状态，并放出巨大的能量，同时产生光和热或机械功。当物质从一种状态“突变”到另一种状态时，它的物理状态或化学成分发生急剧的转变，使其本身所具有的能量(位能)以急剧的速度释放出来，使周围的物体遭受到猛烈的冲击和破坏。

雷电、火山爆发属于自然界的一种爆炸现象；工程建设中利用爆炸能量，造福人类的爆炸是人为受控的爆炸；在生产活动中，发生的违背人们意愿的爆炸，叫事故性爆炸，如矿井井下瓦斯爆炸，锅炉、压力容器爆炸，粮食粉尘爆炸等。

上述几种爆炸现象，均有一个共同的特征，即在爆炸地点的周围压力骤增，使周围介质受到干扰，邻近的物质受到破坏，同时还伴有一定的声响。

1.1.3.2 爆炸的特征

如上所述，爆炸是物质发生的一种急剧的物理、化学变化。在变化过程中伴有物质所含能量的快速释放，变为对物质本身、变化产物或周围介质的压缩能或运动能。爆炸时物系压力急剧增高。

通常爆炸表现有以下特征：

① 爆炸的内部特征 大量气体和能量在有限的体积内突然释放或急剧转化，并在极短时间内在有限体积中积聚，造成高温高压等非寻常状态对邻近介质形成急剧的压力突跃和随后的复杂运动，显示出不寻常的移动或机械破坏效应。

② 爆炸的外部特征 爆炸将能量以一定方式转变为原物质或产物的压缩能，随后物质由压缩态膨胀，在膨胀过程中作机械功，进而引起附近介质的变形、破坏和移动。同时由于介质受振动而发生一定的声响。

例如，乙炔和氧气在储罐内混合进而发生爆炸时，大约在 $1/100\text{s}$ 内发生化学反应，同时释放出大量热能和二氧化碳、水蒸气等气体，能使罐内压力升高 $10 \sim 13$ 倍，其爆炸威力可以使罐体升空 $20 \sim 30\text{m}$ 。

1.1.4 爆炸的分类

工业生产中发生的爆炸事故分类方法很多，可以按照物质爆炸前后发生的变化分类（爆炸性质），也可以按照爆炸事故过程的类型分类，此外还可以按照爆炸反应的相进行分类。

1.1.4.1 按爆炸的性质分类

(1) 物理爆炸

物理爆炸是指物质因状态或压力发生突变而形成的爆炸。它与化学爆炸的明显区别在于物理爆炸前和爆炸后物质的性质及化学成分并不改变。如轮胎充气过度导致的爆炸，只是发生了空气压力减小的变化；蒸汽锅炉超压爆炸也只是水蒸气压力发生变化；夏天中午液化气储罐暴晒导致压力过高，罐体破裂的爆炸也是物理爆炸。物理爆炸的共同原因是容器内气体压力超过了容器的承受能力，某部位发生破裂，内部物质迅速膨胀并释放大量能量。

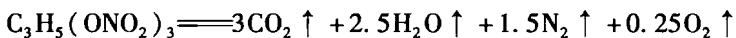
(2) 化学爆炸

化学爆炸是指物质以极快的反应速度发生放热的化学反应，并产生高温、高压所引起的爆炸。化学爆炸前后，物质的组分和性质发生了根本性的变化。如可燃气体或粉尘与空气形成的爆炸性混合物的爆炸，炸药等爆炸物的爆炸等。

化学爆炸按爆炸时物质发生的化学变化又可分为简单分解爆炸、复杂分解爆炸和爆炸性混合物的爆炸三类。

① 简单分解爆炸 该类爆炸物在爆炸时不一定发生燃烧反应，爆炸所需要的能量是由爆炸物本身分解产生的。如乙炔银、雷汞等物质的爆炸反应即属于此类。这类物质极不稳定，受震动即可发生爆炸，是比较危险的爆炸性物质。某些气体由于分解产生很大的热量，在一定条件下也能产生分解爆炸，在受压的情况下更易发生爆炸，如高压存储的乙烯、乙炔发生的分解爆炸等。

② 复杂分解爆炸 爆炸物质在外界强度较大的激发能（如爆轰波）的作用下，能够发生高速的放热反应，同时形成强烈压缩状态的气体成为引起爆炸的高温、高压气体源。这类物质爆炸时伴有燃烧现象，燃烧所需的氧由其本身分解时产生，爆炸后往往将附近的可燃物质点燃，引起火灾。许多炸药（含氧炸药）和一些有机过氧化物爆炸就属于此类，如硝化甘油的爆炸反应：



③ 爆炸性混合物的爆炸 所有的可燃气体、蒸气及粉尘与空气所形成的爆炸性混合物的爆炸均属此类。这类物质的爆炸需要同时具备一定的条件（足够的爆炸物质的含量、氧含量及点火能量等），其危险性较前两类爆炸低，但由于普遍存在于工业生产的许多领域，它所造成的爆炸事故也较多，危害极大，如矿井瓦斯爆炸、工业粉尘爆炸等。

(3) 核爆炸

原子核发生聚变（如氘、氚、锂核聚变）或裂变（ U^{235} 裂变）反应，释放出巨大能量而发生的爆炸为核爆炸。核爆炸可形成数百万到数千万摄氏度的高温，在爆炸中心区可产生数十万兆帕的高压，能量释放相当于数万到数千万吨 TNT 炸药的爆炸能量，同时还伴有大量热辐射和强光。此外，核爆炸还会产生各种对人类生存有害的放射性粒子，造成长时间区域性放射性污染，其破坏力要比物理和化学爆炸大得多。

1.1.4.2 按事故爆炸过程类型分类

爆炸事故总有一定的原因和过程。以系统安全工程学分析爆炸事故发生的原因，采取具体、准确、适用的爆炸防护措施，爆炸事故是可以避免或减轻的。按照事故爆炸的类型，可分为6种，即着火破坏型爆炸、泄漏着火型爆炸、自燃着火型爆炸、反应失控型爆炸、传热型蒸气爆炸、平衡破坏型蒸气爆炸。

① 着火型爆炸 容器、管道、塔槽等(以下称容器)内部的危险性物质，由于点火源给以能量，引起着火、燃烧、分解等化学反应，造成压力急剧上升，使容器爆炸破坏。

② 泄漏型爆炸 容器内部的危险性物质，由于阀门打开或容器裂缝之类的破坏，泄漏到外部，与点火源接触而着火，引起爆炸火灾。

③ 自燃型爆炸 由于化学反应热的蓄积，使温度上升和反应速率加快，当温度升高到这种物质的着火温度时，发生自燃引起爆炸。

④ 反应失控型爆炸 化学反应热的蓄积，使温度上升和反应速率加快，引起物质的蒸气压或分解气体的压力急剧上升，引起容器破坏性爆炸。

⑤ 传热型蒸气爆炸 由于过热液体与其他高温物质接触时，发生快速传热，液体被加热，使之暂时处于过热状态，而引起伴随急剧汽化的蒸气爆炸。

⑥ 平衡破坏型蒸气爆炸 密闭容器内的液体在高压下保持蒸气压平衡时，如果容器破坏，蒸气喷出，因内压急剧下降而失去平衡，使液体暂时处于不稳定的过热状态。由于急剧气化，残留的液体冲破容器壁，这种冲击压的作用使容器再次破坏，发生蒸气爆炸。

1.1.4.3 按爆炸反应相分类

① 气相爆炸 包括可燃性气体和助燃性气体混合物的爆炸；物质的热分解爆炸；可燃性液体的雾滴所引起的爆炸(雾爆炸)；飞扬悬浮于空气中的可燃粉尘引起的爆炸等。其中分解爆炸是不需要助燃性气体的。

② 液相爆炸 包括聚合爆炸、蒸发爆炸以及由不同液体混合所引起的爆炸。例如硝酸和油脂混合时引起的爆炸；熔融矿渣与水接触，由于过热发生快速蒸发引起的蒸气爆炸等。

③ 固相爆炸 包括爆炸性固体物质的爆炸，固体物质的混合、混融所引起的爆炸以及由于电流过载所引起的电缆爆炸等。

液相爆炸和固相爆炸又统称凝聚相爆炸。

1.1.4.4 按照爆炸速度分类

爆炸过程所形成的特征物质的传播速度称为爆炸速度，按照爆炸速度，爆炸可分为爆燃、爆炸和爆轰。

① 爆燃 也称为轻爆，传播速度为每秒几十厘米至数米以下。这种爆炸的破坏力不大，声响也不太大。例如，无烟火药在空气中的快速燃烧、可燃气体混合物在接近爆炸浓度上限或下限时的爆炸等。

② 爆炸 传播速度为每秒十几米至数百米。这种爆炸能在爆炸点引起压力的巨增，有较大的破坏力，有震耳的声响，爆炸产物传播速度很快而且可变。例如，可燃气体混合物在多数情况下的爆炸、火药遇到火源所引起的爆炸等。

③ 爆轰 传播速度为每秒数千米。发生爆轰时能在爆炸点引起极高压力，并产生超音速的“冲击波”。例如，TNT炸药的爆炸速度为6800m/s。

1.1.5 爆炸发生的条件

爆炸发生的条件是复杂的，不同爆炸性物质的爆炸过程有其独特的特征。

1.1.5.1 物理爆炸发生的条件

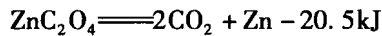
物理爆炸是一种极为迅速的物理能量因失控而释放的过程。在此过程中，体系内的物质以极快的速度把其内部所持有的能量释放出来，转变成机械功、光和热等能量形态。从物理爆炸发生的根本原因考虑，其发生条件可概括为：构成爆炸的体系内存有高压气体或在爆炸瞬间生成的高温高压气体或蒸气的急剧膨胀，爆炸体系和它周围的介质之间发生急剧的压力突变。锅炉爆炸、压力容器爆炸、水的大量急剧气化等均属于此类爆炸。

1.1.5.2 化学爆炸发生的条件

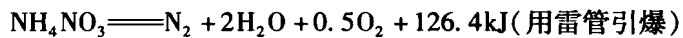
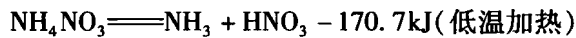
形成化学爆炸的反应过程必须同时具备反应过程放热、反应过程速度极快、反应生成大量气体产物和能自动迅速传播四个条件。

(1) 反应过程的放热性

这是化学反应能否成为爆炸反应的最重要的基本条件，也是爆炸过程的能量来源。没有这个条件，爆炸过程就不能发生，当然反应也就不能自行延续。因此，也就不可能出现爆炸过程的自动传播。如草酸锌、草酸铅的分解反应：



草酸锌、草酸铅的分解是吸热反应，它们需要外界提供热量，反应才能进行，所以它们不可能对外界做功，因而不能爆炸。又如硝酸铵的分解反应：



硝酸铵低温加热的反应，是其用作化肥在农田里发生的缓慢分解反应，反应过程吸热，因此不能爆炸。当硝酸铵被雷管引爆时，则会发生快速的放热分解反应和猛烈爆炸，是矿山爆破常用的一种炸药。

爆炸反应过程所放出的热量称为爆热(或爆热)。它是反应的定容热效应，是爆炸破坏能力的标志，同时也是炸药类物质的重要危险特性。一般常用炸药的爆热约在 3700 ~ 7500kJ/kg；对于混合爆炸物来说，其爆热就是燃烧热。有机可燃物的燃烧热在 48000kJ/kg 左右。

(2) 反应过程的高速度

混合爆炸物质是预先充分混合、氧化剂和还原剂充分接近的体系。许多炸药的氧化剂和还原剂共存于一个分子内。所以，它们能够发生快速的逐层传递的化学反应，使爆炸过程能以极快的速度进行，这是爆炸反应和一般化学反应的一个最重要的区别。一般化学反应也可以是放热反应，而且许多化学反应放出的热量甚至比爆炸物质爆炸时放出的热量大得多，但未能形成爆炸，其根本原因就在于反应速度慢。例如 1kg 木材的燃烧热为 16700kJ，它完全燃烧需要 10min；1kgTNT 炸药爆热只有 4200kJ，它的爆炸反应只需要几十微秒；两者所需的时间相差千万倍。由于爆炸物质的反应速度极快，实际上可以近似认为，爆炸反应所放出的能量来不及逸出，全部聚集在爆炸物质爆炸前所占据的体积内，从而造成了一般化学反应所无法达到的能量密度。正是由于这个原因，爆炸物质爆炸才具有巨大的功率和强烈的破坏作用。

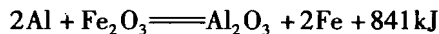
例如 1kg 煤块和 1kg 煤气的燃烧热都是 29000kJ，一块 1kg 的煤块完全燃烧约需 10min，它是一种燃烧过程。而 1kg 煤气和空气混合后，只需 0.2s 即可烧完，却属于爆炸过程；同样这些煤气和空气的混合气，在炸药引爆的条件下只需 0.7ms 就能反应完毕。根据功率与

作功时间成反比的关系，可算出它们的功率如下：1kg 发热量为 29000kJ 的煤块燃烧时发出的功率为 48kW；1kg 发热量为 29000kJ 的煤气和空气的混合气爆燃时发出的功率为 1.4×10^5 kW；1kg 发热量为 29000kJ 的煤气和空气的混合气发生爆轰时发出的功率为 4.1×10^7 kW。这个例子清楚地说明爆炸过程的高速度与相应的释放反应热的高速度是爆炸过程的主要特征。

(3) 变化过程应能产生大量气体产物

气体在通常大气压条件下密度比固体和液体物质要小得多。它具有可压缩性，它比固体和液体有大得多的体积膨胀系数，是一种优良的工质。爆炸物质在爆炸瞬间生成大量气体产物，由于爆炸反应速度极快，它们来不及扩散膨胀，被压缩在爆炸物质原来所占有的体积内；爆炸过程在生成气态产物的同时释放出大量的热量，这些热量也来不及逸出，都加给了生成的气体产物，这样在爆炸物质原来所占有的体积内就形成了处于高温、高压状态的气体。这种气体作为工质，在瞬间膨胀就可以作功，由于功率巨大，对周围物体、设备、房屋就会造成巨大的破坏作用。例如，1L 炸药在爆炸瞬间可以产生 1000L 左右的气体产物，它们被强烈地压缩在原有的体积内，再由于 3000 ~ 5000℃ 的高温，这样就形成了高温、高压气体源，在它们瞬间膨胀时，功率巨大，具有极强的破坏力。可见，爆炸过程气体产物的生成是发生爆炸的重要条件。

在通常条件下，爆炸过程生成气态产物也是产生爆炸作用重要条件之一。也可以通过一些不生成气体产物的强烈放热反应，不具备爆炸作用来说明生成气体产物是产生爆炸的必要条件。例如，铝热剂反应：



此反应热效应很大，足以使产物加热到 3000℃ 的高温，而且反应速度也相当快，但铝热剂并不具备爆炸能力，只是一种高热燃烧剂，根本原因是反应过程不能产生气体产物。由此充分说明了：爆炸过程必须生成气态产物才能造成爆炸作用。

1.1.6 燃烧与化学性爆炸的转化

无论是固体或液体爆炸物，还是气体爆炸混合物，都可以在一定的条件下进行燃烧，但当条件变化时，它们又可转化为爆炸，有时候我们要加以有益的利用，但有时候却应加以制止。

燃烧和爆炸都是迅速的氧化过程，它们的区别如下。

(1) 一般燃料的燃烧需要外界供给助燃的氧，没有氧，燃烧反应就不可能进行。如煤炭在空气中燃烧；某些含氧的化合物（如硝基甲苯等）或混合物，在缺氧的情况下虽然也能燃烧，但由于其含氧不足，隔绝空气后燃烧就不完全或熄灭。而炸药的化学成分或混合物组分中含有丰富的氧元素或氧化剂，发生爆炸变化时无须外界的氧参与反应，所以，它是能够发生自身燃烧反应的物质。爆炸反应的实质就是瞬间的剧烈燃烧反应。

(2) 燃烧的传播是依靠传热进行的，因而燃烧的传播速度慢，一般是每秒几毫米到几百米，而爆炸的传播是依靠冲击波进行的，传播速度快，一般是每秒几百米到几千米。但是，对于可燃性气体、蒸气或粉尘与空气形成的爆炸性混合物，其燃烧与爆炸几乎是不可分的，往往是它被点火后首先燃烧，然后由于温度和压力的升高，使燃烧速度加快，因而连续产生无数个压缩波，这些压缩波在传播过程中叠加成冲击波，使尚未来得及燃烧的其余部分发生爆炸。瓦斯爆炸就是这种类型。

由于燃烧和化学性爆炸的主要区别在于物质的燃烧速度，所以火灾和爆炸的发展过程有显著的不同。火灾有初起阶段、发展阶段和衰弱熄灭阶段等过程，造成的损失随着时间的延续而加重，因此，一旦发生火灾，如能尽快地扑灭，即可减少损失。化学性爆炸实质上是瞬间的燃烧，通常是1s之内，爆炸过程已经完成。由于爆炸威力所造成的人员伤亡、设备毁坏和厂房倒塌等巨大损失均发生在顷刻之间，猝不及防，因此爆炸一旦发生，损失无从减免。

燃烧和化学性爆炸还存在这样的关系，即两者可随条件而转化。同一物质在一种条件下可以燃烧，在另一种条件下可以爆炸。例如煤块只能缓慢地燃烧，如果将煤块磨成煤粉，再与空气混合就可能爆炸，这也说明了燃烧和化学性爆炸在实质上是相同的。

由以上的分析可知，燃烧与爆炸是爆炸物具有的紧密相关的两个特征。从安全技术角度来讲，防止爆炸物发生火灾与爆炸事故就成了紧密相关的问题了。一般来说，火灾与爆炸两类事故往往连续发生。大的爆炸之后常伴随有巨大的火灾；存在有爆炸物质和燃爆混合物的场所，大的火灾往往创造了爆炸的条件，由火灾导致爆炸。因此，了解燃烧与爆炸的关系，从技术上杜绝一切由燃烧转化为爆炸的可能性，是防火防爆技术的一个重要方面。

1.2 化学反应速率

着火条件的分析、火势发展快慢的估计、燃烧历程的研究及灭火条件的分析等，都要用到燃烧反应速率方程。此方程可以根据化学动力学理论得到。

1.2.1 反应速率的基本概念

化学反应速率是指在化学反应中，单位时间内反应物质的浓度改变率，一般用符号 ω 表示。

假如在时刻 τ 时，反应物质的浓度为 c ，在时间 $d\tau$ 后反应物浓度由于化学反应变为 $c - dc$ ，则反应速率 ω [单位为 $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$] 定义为

$$\omega = - \frac{dc}{d\tau} \quad (1-1)$$

式中 ω ——反应速率， $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ；

c ——反应物(或生成物)的浓度， mol/m^3 ；

τ ——发生变化的时间，s。

化学反应速率既可用单位时间内反应物浓度的减少来表示，也可用单位时间内生成物浓度的增加来表示。即在反应过程中，反应物浓度不断降低，而生成物的浓度不断升高。虽然用反应物浓度变化和用生成物浓度变化得出的反应速率值不同，但是它们之间存在单值计量关系，这种计量关系由化学反应式决定。

某一基元反应 $aA + bB \longrightarrow eE + fF$ ，反应速率可写成

$$\begin{aligned} \omega_A &= - \frac{dc_A}{d\tau} & \omega_B &= - \frac{dc_B}{d\tau} \\ \omega_E &= \frac{dc_E}{d\tau} & \omega_F &= \frac{dc_F}{d\tau} \end{aligned} \quad (1-2)$$

以上四个反应速率之间有如下关系：

$$\frac{1}{a}\omega_A = \frac{1}{b}\omega_B = \frac{1}{e}\omega_E = \frac{1}{f}\omega_F \quad (1-3)$$

式(1-3)表明化学反应的反应物浓度的降低速率与生成物浓度的增加速率成正比关系，比例系数由化学反应计量比确定。

1.2.2 质量作用定律

化学计量方程式表达反应前后反应物与生成物之间的数量关系，但是，这种表达式描述的只是反应的总体情况，没有说明反应的实际过程，即未给出反应的中间过程。例如氢与氧化合生成水的反应可用 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 表达，但实际上 H_2 和 O_2 需要经过若干步反应才能转化为 H_2O 。

反应物分子在碰撞中一步转化为产物分子的反应，称为基元反应。一个化学反应从反应物分子转化为最终产物分子往往需要经历若干个基元反应才能完成。实验证明：对于单相的化学基元反应，在等温条件下，任何瞬间化学反应速率与该瞬间各反应物浓度的某次幂的乘积成正比。在基元反应中，各反应物浓度的幂次等于该反应物的化学计量系数。

这种化学反应速率与反应物浓度之间关系的规律，称为质量作用定律。其简单解释为：化学反应是由于反应物各分子之间碰撞后产生的，因此单位体积内的分子数目越多，即反应物浓度越大，反应物分子与分子之间碰撞次数就越多，反应过程进行得就越快，因此，化学反应速率与反应物的浓度成正比关系。

对于反应式 $a\text{A} + b\text{B} \longrightarrow e\text{E} + f\text{F}$ ，根据质量作用定律可以得出其化学反应速率方程为

$$\omega = kc_A^a c_B^b \quad (1-4)$$

式中 k ——比例常数，或称反应速率常数，其值等于反应物为单位浓度时的反应速率，数值 k 取决于反应的温度以及反应物的物理化学性质。

必须强调指出，质量作用定律只适用于基元反应，因为只有基元反应才能代表反应进行的真实途径。对于非基元反应，只有分解为若干个基元反应时，才能逐个运用质量作用定律。

1.2.3 阿累尼乌斯定律

大量实验证明：反应温度对化学反应速率的影响很大，同时这种影响也很复杂，但是最常见的情况是反应速率随着温度的升高而加快。温度对反应速率的影响，集中反映在反应速率常数 k 上。阿累尼乌斯提出了反应速率常数 k 与反应温度 T 之间有如下关系：

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1-5)$$

式中 k ——阿累尼乌斯反应速率常数， $\text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ ；

k_0 ——取决于反应物系数的频率因子， $\text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ ；

E ——反应物活化能， kJ/mol ；

R ——通用气体常数， $\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ；

T ——温度， K 。

在上式中，相对于 $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ ，温度对 k_0 的影响可以忽略不计。