

RANSHAO YU
BAOZHA LILUN

— 高等学校教材 —

燃烧与爆炸理论

● 赵雪娥 孟亦飞 刘秀玉 编
● 魏新利 审



化学工业出版社

高等学校教材

燃烧与爆炸理论

赵雪娥 孟亦飞 刘秀玉编
魏新利审



化学工业出版社

·北京·

本书涉及了燃烧、爆炸的基本原理,着重论述了燃烧爆炸危险性物质及其特性、燃烧爆炸事故后果分析,对实际生产有一定的指导作用。本书引用了最新的国家标准 GB 18218—2009《危险化学品重大危险源辨识》以及化工企业定量风险评价导则(征求意见稿),更新了危险化学品的分类方法。

本书理论与实践并重,在理论上阐明基本原理的同时,重视工程上的实用性。书中详细阐述了9类共计85种典型的燃烧、爆炸危险性物质的燃爆特性及灭火方法,以及15个泄漏、池火灾、蒸气云爆炸、沸腾液体扩展蒸气云爆炸、物理爆炸、中毒等事故后果进行的定量分析和计算实例。此外书中所列入的工艺参数、相关数据对生产实践均有一定的参考价值。

该书系统性强、内容充实、实用性强,可作为高等院校的化工安全工程等相关专业教材,也可作为消防工程从业人员、安全评价人员以及从事相关专业的研究人员和技术管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧与爆炸理论/赵雪娥,孟亦飞,刘秀玉编. —北京:化学工业出版社,2010.12

高等学校教材

ISBN 978-7-122-09743-9

I. 燃… II. ①赵…②孟…③刘… III. ①燃烧学-高等学校教材②爆炸-理论-高等学校-教材 IV. 0643.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第205375号

责任编辑:程树珍 金玉连

装帧设计:周 遥

责任校对:郑 捷

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张12 $\frac{1}{2}$ 字数334千字 2011年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

前 言

自盘古开天，燃烧、爆炸与人类社会的发展密不可分。从茹毛饮血的祖先钻木取火的那一刻起，人类就不再惧怕寒冷，不用吞下生肉，不怕野兽袭击。得益于火药的发明，鞭炮增添了节日的喜庆气息。核聚变产生的新能源使世界为之喝彩，却阻止不了原子弹毁灭了日本广岛、长崎。化石燃料给人类社会带来了诸多便利，而其产物二氧化碳导致的温室效应，又给我们带来了生存危机。“科学技术是一把双刃剑”，燃烧、爆炸既造福了人类，也给人类留下痛苦的回忆。

近年来，随着石油、化学工业的迅猛发展，新工艺、新技术、新装置、新产品层出不穷，由此造成燃烧、爆炸事故频发。关于燃烧与爆炸理论的书籍纷纷面世，却多偏重于火灾与爆炸的防治。通过多年的教学实践，笔者发现，作为化工安全工程专业的学生需要的不仅是一些防火防爆技术，更重要的是要系统了解及掌握燃烧、爆炸发生、发展的过程并对可能造成事故进行定性、定量的后果分析。

本书所用素材，部分来自我们多年来从事燃烧与爆炸理论相关学科的教学、科研以及对外协作的积累和体会，部分来自于对近年来国内外出版的相关教材、专著的学习和吸收。本书的基本内容已作为安全工程本科专业的主干课《燃烧与爆炸理论》的讲义使用多年，取得了良好的教学效果。现在在此基础上加以修订和补充，使之更适合教学的需要。

教材在内容上，力求正确阐述各门学科的基本理论、基础知识，既注重教材的深度和广度，又注重突出基本理论、基础知识在安全生产工作中的具体应用，并兼顾到内容的科学性、系统性和实用性。

在本书的编写过程中得到了魏新利教授、詹予忠教授、刘诗飞教授等同仁的大力支持和帮助，在此一并向诸位表示衷心的感谢。

本书的第1章、第2章、第6章~第8章由赵雪娥编写，第3章由孟亦飞编写，第4章、第5章由刘秀玉编写，全书由赵雪娥整理，魏新利主审。

由于作者学识、经验所限，书中可能出现的缺点、错误，敬请同仁和读者予以批评指正。

编 者

2010年9月

目 录

1 绪论	1	2.6.3 典型固体物质的燃烧	31
1.1 燃烧与爆炸的基本概念	1	2.7 燃烧产物的毒害作用	37
1.1.1 燃烧	1	2.7.1 火场中热烟气的一般毒害作用	37
1.1.2 爆炸	2	2.7.2 碳氢化合物燃烧产物的毒性	38
1.1.3 燃烧与爆炸的关系	2	2.7.3 高聚物燃烧产物的毒害作用	38
1.2 化工生产过程中的燃烧爆炸事故	2	2.7.4 其他燃烧产物的毒害作用	41
1.2.1 现代化工生产的特点	2	2.8 热值与燃烧温度	41
1.2.2 工业装置燃烧爆炸事故常见模式	3	2.8.1 热值及其计算	41
1.2.3 重大火灾、爆炸事故案例	5	2.8.2 燃烧温度及其计算	42
1.3 火灾损失统计	7	3 爆炸基本原理	43
1.3.1 2007年火灾损失统计	7	3.1 爆炸及其分类	43
1.3.2 2008年火灾损失统计	8	3.1.1 爆炸概述	43
1.3.3 2009年火灾损失统计	8	3.1.2 爆炸的分类	43
2 燃烧基本原理	9	3.2 可燃气体爆炸	44
2.1 燃烧条件	9	3.2.1 单一气体分解爆炸	44
2.1.1 燃烧三要素	9	3.2.2 混合气体爆炸	45
2.1.2 燃烧的充分条件	9	3.2.3 爆炸极限	46
2.1.3 燃烧条件的应用	11	3.2.4 爆炸极限的计算	49
2.1.4 火灾分类	12	3.3 爆燃及爆轰	55
2.2 燃烧形式及燃烧过程	13	3.4 粉尘爆炸	57
2.2.1 燃烧类型	13	3.4.1 粉尘爆炸概述	57
2.2.2 燃烧形式及分类	15	3.4.2 粉尘爆炸的条件、过程及特点	57
2.3 燃烧理论	15	3.4.3 影响粉尘爆炸的因素	59
2.3.1 活化能理论	15	3.4.4 爆炸温度及压力的计算	62
2.3.2 过氧化物理论	16	4 可燃物质的危险特性	64
2.3.3 链式反应理论	16	4.1 闪点、燃点和自燃点	64
2.4 气体燃烧	18	4.1.1 闪点及其测定方法	64
2.4.1 气体燃烧过程	18	4.1.2 燃点	65
2.4.2 气体燃烧形式	18	4.1.3 自燃点	65
2.4.3 气体燃烧速度	19	4.2 氧指数及其测定	66
2.4.4 气体燃烧速度影响因素	19	4.2.1 氧指数	66
2.5 液体燃烧	21	4.2.2 氧指数的测定方法	66
2.5.1 液体燃烧过程	21	4.3 最小点火能和最小点燃电流	67
2.5.2 液体燃烧形式	22	4.3.1 最小点火能	67
2.5.3 液体燃烧速度	25	4.3.2 最小点燃电流	69
2.5.4 液体燃烧速度影响因素	25	4.4 消焰距离和安全间隙	69
2.5.5 油罐火灾	27	4.4.1 消焰距离	69
2.6 固体燃烧	29	4.4.2 最大安全间隙	69
2.6.1 固体燃烧过程	29	5 点火源与引爆能	71
2.6.2 固体燃烧形式	30	5.1 明火	71

5.1.1	生产过程中的明火	71	6.7.4	忌水性物质着火应急措施	110
5.1.2	其他明火	72	6.8	氧化剂	111
5.2	自燃着火	73	6.8.1	氧化剂概述	111
5.2.1	自燃性物质的分级	73	6.8.2	氧化剂分类分级	112
5.2.2	自燃的控制	73	6.8.3	氧化剂储运注意事项	112
5.2.3	忌水性物质	77	6.8.4	典型氧化剂和有机过氧化物	112
5.2.4	混合危险性物质	78	6.9	爆炸品	116
5.3	电火源	79	6.9.1	爆炸品概述	116
5.3.1	电热	79	6.9.2	炸药的分类	117
5.3.2	电火花	81	6.9.3	炸药爆炸参数	118
5.4	冲击和摩擦	82	6.9.4	炸药安全特性	118
5.4.1	分类	82	6.9.5	典型爆炸品	122
5.4.2	控制与消除	82	6.10	混合危险物质	125
5.5	高温表面	82	7	燃烧、爆炸事故后果分析	127
6	燃烧、爆炸危险物质	84	7.1	后果分析的一般程序	127
6.1	燃烧、爆炸危险物质相关的国家标准	84	7.1.1	后果分析程序	127
6.1.1	化学品分类和危险性公示通则 (GB 13690—2009)	84	7.1.2	后果分析所需参数	127
6.1.2	危险货物分类 (GB 6944— 2005)	85	7.1.3	后果分析模式选择	127
6.1.3	危险货物包装标志 (GB 190— 1990)	87	7.2	泄漏	131
6.2	可燃性气体和蒸气	90	7.2.1	泄漏设备及损坏尺寸	131
6.2.1	可燃性气体和蒸气概述	90	7.2.2	泄漏量的计算	134
6.2.2	典型可燃性气体	91	7.3	蒸发与绝热膨胀	136
6.2.3	可燃性气体分类	93	7.3.1	液体的扩展与蒸发	136
6.3	易燃和可燃液体	94	7.3.2	喷射扩散	139
6.3.1	易燃和可燃液体分类	94	7.3.3	绝热膨胀	139
6.3.2	易燃和可燃液体燃烧、爆炸危险性 判据	94	7.4	气云在大气中的扩散	140
6.3.3	典型易燃液体	95	7.4.1	重气扩散	141
6.4	可燃固体	98	7.4.2	非重气扩散	143
6.4.1	可燃固体燃爆危险性	98	7.5	火灾事故后果分析	148
6.4.2	可燃固体分类	98	7.5.1	热辐射破坏准则	148
6.4.3	典型易燃固体	99	7.5.2	池火	149
6.5	可燃粉尘	102	7.5.3	喷射火	152
6.5.1	可燃粉尘分类	102	7.5.4	火球	153
6.5.2	可燃粉尘燃爆危险性	102	7.5.5	闪火	154
6.6	自燃性物质	103	7.5.6	热辐射伤害概率模型	154
6.6.1	自燃性物质分类	103	7.6	爆炸后果分析	155
6.6.2	自燃性物质分级	103	7.6.1	爆炸伤害准则	155
6.6.3	典型自燃物品	104	7.6.2	凝聚相爆炸伤害模型	155
6.7	忌水性物质	106	7.6.3	蒸气云爆炸伤害模型——TNT 当量法	156
6.7.1	忌水性物质分类	106	7.6.4	爆炸伤害概率模型	157
6.7.2	忌水性物质分级	106	7.6.5	物理爆炸后果分析	157
6.7.3	典型遇湿易燃物品	106	7.7	中毒	160
			7.7.1	描述毒物泄漏后果的概率 函数法	160

7.7.2 有毒液化气体容器破裂时的毒害区估算	161	面积	180
7.8 事故后果分析应用实例	162	8.4 防火分隔与防爆泄压	181
7.8.1 泄漏事故后果分析	162	8.4.1 防火墙	181
7.8.2 池火灾事故后果分析	163	8.4.2 防火间距	182
7.8.3 化学性爆炸事故后果分析	164	8.4.3 防爆泄压	183
7.8.4 物理性爆炸事故后果分析	167	8.5 火灾与爆炸监测	184
7.8.5 毒物泄漏事故后果分析	169	8.5.1 火灾监测仪表	184
8 火灾与爆炸防治技术	171	8.5.2 测爆仪	186
8.1 火灾发生的条件	172	8.6 防火与防爆安全装置	186
8.1.1 火灾产生的原因	172	8.6.1 阻火装置	186
8.1.2 火灾事故的发展过程	172	8.6.2 泄压装置	187
8.1.3 火灾、爆炸事故的特点	172	8.6.3 指示装置	188
8.2 生产过程的火灾爆炸危险性分类	173	8.7 预防形成爆炸性混合物的方法	190
8.2.1 生产的火灾危险性分类	173	8.7.1 以不燃或难燃材料代替可燃或易燃材料, 提高耐火极限	190
8.2.2 储存物品的火灾危险性分类	175	8.7.2 密闭设备, 不使可燃物料泄漏和空气渗入	191
8.2.3 爆炸和火灾危险场所等级的划分	177	8.7.3 加强通风, 使可燃气体、蒸气或粉尘达不到爆炸极限	192
8.3 工业建筑的耐火等级	178	8.7.4 严格清洗或置换	192
8.3.1 建筑构件的耐火等级	178	8.7.5 惰性介质保护	192
8.3.2 厂房的耐火等级、层数和占地面积	179	参考文献	193
8.3.3 库房的耐火等级、层数和占地			

1 绪 论

燃烧，俗称火，是自然界中最神奇和最常见的自然现象之一，是人类在生活中不可缺少的伙伴。远古时期的人学会了钻木取火或以燧石打出火星来生火，开始用火熟食，后来又用火制陶、酿酒、煮盐、冶炼金属、烧制玻璃、发明火药等。人们从用火的实践中开始认识到火除了发光、发热之外，还能使物质发生变化。如果从我们的祖先“元谋人”使用野火的那个时候算起，至今最少也有一百多万年的历史了。在这漫长的历史长河中，出现了诸如关于火的“本源”论、“五行”论、“四大”论、“四元”论、“火微粒”论、“燃素”论。

17 世纪末，德国的斯皓尔提出燃素论作为燃烧理论。按照燃素论，一切物质之所以能够燃烧，都是由于其中含有被称为燃素的物质。当燃素逸至空气中时就引起了燃烧现象，逸出的程度愈强，就愈容易产生高热、强光和火焰。物质易燃和不易燃的区别，就在于其中含有燃素量的多寡不同。这一理论对许多燃烧现象给予了说明。但是，一些本质问题尚不清楚，如燃素的本质是什么？为什么物质燃烧重量反而增加？为什么燃烧使空气体积减小？

1774 年英国化学家普里斯特利在实验室里用聚光镜分解汞锻灰时，析出并发现了氧，后来这一发现被法国化学家拉瓦锡得知，并在普里斯特利实验的基础上重复做了大量的实验，经过综合分析和归纳，得出了关于燃烧的氧化学说，并于 1777 年公布于世。这一学说认为：物质只有在氧中才能燃烧，燃烧是物质和氧的化合反应。由于燃烧是物体和氧的化合反应，燃烧产物所增加的质量必然和物体所吸收的氧的质量相等。从而揭开了燃烧之谜，宣告了燃素论的破灭。

人类对自然界的认识是不断发展的。在科学史上，燃烧的氧化理论代替了“燃素”说，是一个伟大的进步。但是氧化理论也还不是人类对火和燃烧认识的终结，后来又出现了燃烧的活化能理论、过氧化物理论、连锁反应理论等。人类对火和燃烧的认识还会不断发展、继续前进。

1.1 燃烧与爆炸的基本概念

1.1.1 燃烧

燃烧是伴随有发光、放热现象的剧烈的氧化反应。放热、发光、生成新物质是燃烧现象的三个特征。

最初氧化这名词仅被理解为氧与物质的化合，而还原则认为是物质之失去氧。但现在则被理解为被氧化物质之失去电子，而还原则认为是被还原物质之得到电子。例如在氯化氢中，氯为一价，而氯从氢中取得一个电子，因此氯在这种情况下即为氧化剂。这就是说，氢被氯所氧化，并放出热和呈现出火焰。同样，当金属钠在氯气中燃烧时生成氯化钠，可以说钠被氧化而生成氯化钠。

燃烧一般在空气或氧气中进行，氧是氧化剂。但是氧化剂并不限于氧气，氯在氢气中燃烧，炽热的铁、铜与氯气反应等均为燃烧现象。

燃烧不包括一般的不发光的氧化还原反应。如铁生锈、脂肪在人体中的氧化等。因此，能够被氧化的物质不一定都能燃烧，而能燃烧的物质一定能被氧化。

在铜与稀硝酸的反应中，反应结果生成硝酸铜，其中铜失掉两个电子被氧化，但在该反应

中没有同时产生光和热，所以不能称它为燃烧。灯泡中的灯丝连通电源后虽然同时发光、发热，但它也不是燃烧，因为它不是一种激烈的氧化反应，而是由电能转变为光能的一种物理现象。

1.1.2 爆炸

爆炸是物质从一种状态迅速地转变到另一种状态，并在瞬间放出巨大能量同时产生巨大声响的现象。

爆炸现象的特征：爆炸过程进行得很快；爆炸点附近压力急剧升高，多数爆炸伴有温度升高；发出或大或小的响声；周围介质发生振动或邻近的物质遭到破坏。

按照爆炸的性质不同，爆炸可以分为物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。

1.1.3 燃烧与爆炸的关系

燃烧与爆炸有着密切的关系，尤其是化学爆炸，其反应实质与燃烧完全相同，都是氧化还原反应。另一方面，燃烧与爆炸也有区别，其中最主要的差异就是反应速度不同。例如，可燃气体与空气混合系爆炸与燃烧的本质相同，但速度更快；炸药等爆炸是自身氧化还原反应。

燃烧与爆炸在一定条件下转化。例如，物理爆炸可以间接引起火灾，而化学爆炸可以直接导致火灾。

物质发生燃烧或爆炸与自身因素和外界因素有关。炸药也可以稳定燃烧而不爆炸；混合系燃烧或爆炸与空间限制密切相关；粮食、纤维、煤炭、金属粉尘可发生粉尘爆炸。

1.2 化工生产过程中的燃烧爆炸事故

化工企业的火灾、爆炸事故所造成的损失约占其所有事故损失的 50%，这是由现代化工生产的特点决定的，下面对其进行专门探讨。

1.2.1 现代化工生产的特点

(1) 原材料及产品种类繁多

原材料、产品种类繁多，状态多变，绝大多数为易燃、易爆、有毒、腐蚀性物质。

统计资料表明，石油化工生产所涉及的原料、中间产品、产品、辅料等有 400 万余种，其中绝大多数具有易燃易爆、有毒有害、腐蚀性等特点。例如，油田气、炼厂气、天然气、煤气等都是燃点低、爆炸下限低、最小点火能小的物质，极易引燃爆炸。原油及其产品、各种烃类、树脂等亦都是易燃易爆物质。而且生产中所使用的原料及其产品状态多变，气、液、固、气液、气固、液固、气固等各种状态都可能存在。加之温度、压力、物料流速及流量等操作控制条件的诸多变化，使其生产过程具有较大的火灾爆炸危险性。

(2) 生产装置规模大型化

装置规模大型化，能显著降低单位产品的建设投资和生产成本，提高企业的劳动生产率，降低能耗，提高经济效益。因此，物料处理量大、产品产量高、装置规模大型化是现代石油化工生产的显著特点。目前，我国炼油生产装置年最大加工能力已达到 $800 \times 10^4 \text{t/a}$ ，乙烯生产装置规模已达到 $45 \times 10^4 \text{t/a}$ ，并即将扩建到 $100 \times 10^4 \text{t/a}$ 的更大规模，合成氨生产装置规模已达到 $35 \times 10^4 \text{t/a}$ 以上。装置的大型化有效地提高了生产效率，但规模越大，储存的危险物料越多，潜在的火灾爆炸危险性越大，事故后果越严重。

(3) 生产工艺过程高度连续自动化

石油化工生产从原料输入到产品输出具有高度的连续性，前后生产单元之间环环相扣，紧密相连，相互制约，某一环节出现故障常常会影响整个生产的正常进行。由于装置规模大型

化、生产过程连续化、工艺过程复杂以及工艺控制参数要求严格,必然要求现代石油化工生产必须采用自动化程度较高的控制系统。自动化控制能大大地节约劳动生产力,提高生产效率以及生产的安全系数,但是自动控制系统和检测仪器仪表维护保养不周,往往因为误操作、误报警引起事故甚至导致事故扩大。连续化使事故互相影响,局部事故全面停车。

(4) 生产工艺高参数化

工艺控制参数苛刻,生产操作严格。石油化工生产为了提高设备的单机效率和产品的收率,缩短产品生产周期,获得最佳经济收益,许多工艺大都在高温(乙烯裂解炉大于 1000°C)、高压(合成氨大于 10MPa ,高压聚乙烯大于 280MPa)、高速、低温(液化天然气低于 -200°C)、低压、临界甚至超临界状态下进行,工艺参数前后变化大,要求苛刻,控制严格,同时也增大了生产的火灾爆炸危险。

(5) 生产设备类型多样,结构简繁不一,动态设备与静态设备并存

化工生产中动态设备主要有各种油泵、水泵、压缩机、风机、真空泵、破碎机、研磨机等。静态设备主要包括各种塔、器、釜、罐、槽、炉、管线等。就设备结构而言,不同种设备结构不同,同种设备结构也千差万别。例如,塔按其功能不同有精馏塔、吸收塔、萃取塔、中和塔等;容器设备按其功能不同有反应器、换热器、缓冲器等,泵按其原理不同有离心泵、往复泵、旋转泵和液体作用泵等。

(6) 生产综合化,产品和生产方法多样化

现代大型石油化工生产都是集原料加工、中间产品再处理和产品再加工于一体,成为多种产品的综合性企业。生产一种产品可以联产或副产多种其他产品,同时又需要多种其他原料和中间体配套。同一种产品的生产往往可以采用不同的原料和不同的生产方法,例如,苯可以通过石脑油铂重整获得,炼厂副产获得,裂解制乙烯副产以及甲苯经脱烷基制取。而用同一种原料采用不同的方法可以得到不同的产品。例如以乙炔为原料可以得到多种产品,合成橡胶、人造树脂、丙酮、烯酮、炭黑等。

1.2.2 工业装置燃烧爆炸事故常见模式

(1) 装置外混合系爆炸

可燃物质泄漏于装置外,引起火灾或爆炸事故。

① 装置质量因素的泄漏 材料错误,品质不符;强度不足;加工、制造缺陷;裂纹扩展;结构缺陷;密封失效。

② 装置工艺因素的泄漏 高流速介质冲刷与摩擦;反复应力作用;腐蚀;蠕变失效;冷脆断裂;结焦;结垢;老化变质;内压超高。

③ 外力因素 外力打击;运载过程倾倒施工破坏;强力拉断;基础下沉或倾斜;支撑体变化;自然灾害;人为因素;操作失误;有意破坏。

(2) 装置内混和系爆炸

装置内形成爆炸物质。

① 空气进入装置 负压;密封失效;隔断阀打开;空气压送。

② 配气错误 气源错误;操作错误;计算设定错误。

③ 新生爆炸系 新生气体;新生爆炸危险物;新生过氧化物;杂质积累。

④ 可燃气错误 点燃失控;燃烧中断;隔断失效;压差失控;气体倒流。

(3) 压力平衡破坏爆炸

① 高压窜入低压系统 隔断失效;负压;逆止阀失效;液封失效。

② 憋压 系统阻力;排空系统失效;呼吸阀失效;液封或气阻,出口阀关闭。

③ 倒流 气源中断;逆止阀失效;反转。

④ 负压 真空过大；系统降温；呼吸阀失效；冷夜浸入；液位降低。

(4) 过压爆炸

- i. 高压窜入；
- ii. 压缩气源增压；
- iii. 异常反应；
- iv. 热膨胀；
- v. 真空失效。

(5) 热平衡破坏爆炸

- ① 反应物料配比变化 超浓度；配置错误；错误配比。
- ② 初始反应温度低 未启动搅拌及加热系统；热载体问题。
- ③ 反应物积聚过量 计量错误；加料速度过快。
- ④ 温升过快 降温系统失效；催化剂活性高；引发剂过量。
- ⑤ 催化剂影响 活化过程失效；数量不准；粒径、规格不符。
- ⑥ 热敏感物、副产物 原料杂质影响；残存物积累。
- ⑦ 过反应物 温度或压力失控；反应周期过长。
- ⑧ 测量控制系统有误 调节系统失控；计量错误。
- ⑨ 异常反应 暴聚；加热介质选择不当。

(6) 蒸汽爆炸

- i. 外壳破坏、气液平衡破坏、液体介质汽化闪蒸
- ii. 过热液体减压闪蒸
- iii. 超过临界温度液体汽化
- iv. 低沸点液体进入高温系统
- v. 高温热载体夹带低沸点液体
- vi. 反应热液相快速汽化
- vii. 满罐胀裂液体迅速汽化

(7) 液化气体、过热液体爆炸

- ① 容器质量因素破裂 设计强度不够；材质、制造、加工缺陷。
- ② 外热影响温度超高 装置内外的固定热源。
- ③ 满罐胀裂 残液未清导致超装；低温充装。
- ④ 内部反应热 倒罐时混进反应物；沉淀或积累危险物；混装。

(8) 装置泄漏

① 本体材料泄漏 材质缺陷；局部应力；反复载荷；蠕变外力；应力腐蚀；残余应力；裂纹扩展；异常温度；异常外力；腐蚀穿孔。

② 法兰泄漏 平行度不良，加工缺陷；紧固缺陷；热变形；腐蚀；材质不符；错装备；热应力；疲劳；外力；强度影响。

③ 焊缝 焊条选择不当；焊接电流影响；加工接口不良；杂质异物影响；施焊方法不当；材质问题；残余应力；裂纹；热膨胀；振动。

④ 衬垫 材质不良；残余应力；缩孔；位移；硬度影响；机械强度；使用错误；疲劳；内压增大；振动；热应力；反复荷重；安装质量；腐蚀。

⑤ 螺栓 材质影响；应力影响；温差影响；安装质量；选型不当；内压作用；振动。

(9) 凝聚相燃烧爆炸

- i. 罐内流体快速燃烧；

- ii. 装置内油及其他易燃液体快速燃烧；
- iii. 油面燃烧引起热波突沸；
- iv. 装置内物系热分解；
- v. 装置内残渣或残留物受热分解；
- vi. 溶解气体释放被点燃；
- vii. 装置保温材料局部燃烧。

(10) 分解爆炸

- i. 单一气体分解爆炸；
- ii. 爆炸物受热分解爆炸；
- iii. 有机过氧化物热分解爆炸；
- iv. 无机过氧化物分解爆炸；
- v. 热敏感物分解爆炸；
- vi. 有机物热分解爆炸；
- vii. 高分子物热分解爆炸
- viii. 釜残物热分解爆炸。

(11) 混合危险爆炸

- i. 氧化剂与还原剂反应
- ii. 遇水燃烧
- iii. 遇水发热
- iv. 混合发热。

(12) 喷雾爆炸

- i. 可燃液体高速泄漏；
- ii. 装置排空；
- iii. 可燃液体喷射；
- iv. 气体凝缩；
- v. 可燃液体飞散降落；
- vi. 高压油路系统泄漏；
- vii. 喷井引燃；
- viii. 压缩气体中带油雾。

(13) 粉尘爆炸

- i. 高速风送粉尘静电火花引爆；
- ii. 悬浮粉尘被点燃；
- iii. 堆积粉尘燃烧引爆。

1.2.3 重大火灾、爆炸事故案例

【案例 1】 孙家湾矿难

2005 年 2 月 14 日 15 时 03 分，辽宁省阜新矿业（集团）有限责任公司孙家湾煤矿海州立井发生一起特别重大瓦斯爆炸事故，死亡 213 人。30 人受伤，直接经济损失 4968.9 万元。

直接原因 冲击地压造成 3316 工作面风道外段大量瓦斯异常涌出，3316 风道里段掘进工作面局部停风造成瓦斯积聚，致使回风流中瓦斯浓度达到爆炸极限；工人违章带电检修架子道（距专用回风上山 8m 处）临时配电点的照明信号综合保护装置，产生电火花引起瓦斯爆炸。

【案例 2】 山西襄汾花炮厂爆炸

2005 年 1 月 11 日 14 时 30 分左右，位于山西省襄汾县京安村的襄汾花炮厂突然发生爆

炸。事故共造成 26 人死亡, 9 人受伤, 直接经济损失近 630 万元人民币。

直接原因 违章用机动车装运礼花弹时, 不仅超高、超重, 而且未采取固定措施。在使用前未对车辆进行认真清理。在倒车过程中, 包装箱底部与车厢发生摩擦, 使遗漏的烟火药剂尤其是黑火药、氯酸钾受摩擦产生火花, 引发爆炸。

【案例 3】 洛阳东都商厦火灾

2000 年 12 月 25 日, 河南省洛阳市东都商厦发生特大火灾事故火灾, 死亡 309 人。直接经济损失 275 万元。

直接原因 该商厦负一层非法施工、施焊、电焊火花溅落到地下二层家具商场的可燃物, 造成火灾。施焊人员明知商厦地下二层存有大量可燃木制家具, 却在不采取任何防护措施的情况下违法施工, 导致火灾发生。

【案例 4】 哈尔滨亚麻纺织厂爆炸

1987 年 3 月 15 日 2 时 39 分, 哈尔滨亚麻纺织厂爆炸, 造成伤亡 235 人, 其中重伤 65 人, 轻伤 112 人, 死亡 58 人。直接经济损失 881.9 万元。

直接原因 静电引起亚麻粉尘爆炸。

【案例 5】 吉林市煤气公司液化石油气厂 102 号罐爆炸

1979 年 12 月 18 日 14 点 7 分, 吉林市煤气公司液化气站的 102 号 400m³ 液化石油气球罐发生破裂, 裂口长达 13m 多, 大量液化石油气喷出, 顺风向北扩散, 遇明火发生燃烧, 引起球罐爆炸。大火烧了 19h, 致使 5 个 400m³ 的球罐、4 个 450m³ 卧罐和 8000 多只液化石油气钢瓶 (其中空瓶 3000 多只) 爆炸或烧毁, 死 36 人, 重伤 50 人。直接经济损失约 627 万元。

直接原因 焊接质量低劣, 球罐破裂。

【案例 6】 德州石油化工厂电解车间液氯工段液氯钢瓶爆炸

1985 年 3 月 22 日, 山东省德州石油化工厂电解车间液氯工段液氯钢瓶爆炸, 当场炸死 3 人, 重伤 2 人, 液氯充装管道被炸毁, 厂房遭到严重破坏。

直接原因 回收钢瓶未经检验, 内部残留芳香烃, 充气时发生剧烈反应引起高温高压爆炸。

【案例 7】 1991 年、1993 年河南两起过氧化苯甲酰爆炸事故

1991 年 12 月 6 日下午 2 时 15 分, 许昌制药厂一分厂干燥器内的过氧化苯甲酰发生化学分解强力爆炸, 死亡 4 人, 重伤一人, 轻伤 2 人。

1993 年 6 月 26 日, 郑州市食品添加剂厂 7t 多过氧化苯甲酰爆炸事故, 死 27 人, 受伤 33 人, 经济损失 300 万元。

直接原因 具体原因不详, 但仓库、厂房、办公区布局不合理。

【案例 8】 温州市电化厂氯气车间液氯钢瓶爆炸

1979 年 9 月 7 日, 温州市电化厂氯气车间发生了一起液氯钢瓶爆炸的恶性事故。有 59 人死亡, 779 人中毒住院, 400 多人接受门诊治疗。直接经济损失达 63 万多元。

有一块 0.8kg 的钢片竟飞离出事地点 800m 左右, 还有一块 72kg 的钢片飞越厂区, 击断树干, 穿透砖墙, 落到 85m 外居民住宅里, 把一位正在忙碌家务的老大娘砸死。爆炸气浪使 444m² 的钢筋混凝土厂房夷为平地。爆炸中心的水泥地面被作成深 1.8m、直径 6m 的大坑。

直接原因 瓶内液体石蜡与氯反应造成爆炸, 引起其他钢瓶爆炸。用户使用氯气违章, 使液体石蜡倒灌入钢瓶。充装前未检验钢瓶。

【案例 9】 长沙市造纸厂芦苇火灾

1988 年 8 月 2 日下午 7 时 20 分, 长沙市造纸厂芦苇堆起火, 大火在 7h 以后才被控制住, 待完全把火扑灭, 已是 5 天 5 夜以后了。这场大火, 烧掉造纸原料芦苇约 2000t, 直接经济损

失达 40 多万元。

直接原因 潮湿芦苇自燃。事先有征兆，发现芦苇碳化、有烫死的老鼠，但没人知道芦苇会自燃，未采取措施。

【案例 10】 深圳市清水河危险化学品仓库爆炸

1993 年 8 月 5 日 13 时 26 分，深圳市安贸危险物品储运公司（以下简称安贸公司）清水河危险化学品仓库发生特大爆炸事故，爆炸引起大火，14 时后着火区又发生第二次强烈爆炸。这起事故造成 15 人死亡、200 人受伤，其中重伤 25 人，直接经济损失 25 亿元。

直接原因 过硫酸铵（强氧化剂）与硫化碱（还原剂）接触，发生激烈的氧化还原反应，热量积聚导致起火燃烧，并引燃引爆仓内其他化学品，最终引发硝酸铵爆炸成灾。

【案例 11】 青岛市黄岛油库火灾

1989 年 8 月 12 日 9 时 55 分，胜利输油公司所属青岛市黄岛油库特大爆炸火灾事故，大火前后燃烧了 104h，有 14 名消防官兵牺牲，66 人受伤；5 名油库职工牺牲，12 人受伤。烧掉原油 3.6 万吨，烧毁油罐 5 座，直接经济损失 3500 多万。600t 原油流入海里，使附近海域和沿岸受到一定程度的污染。整个救援中动用了 2204 名公安、消防战士，159 辆消防车，10 架飞机，19 艘舰船，239 吨灭火药剂。

直接原因 非金属油罐本身存在缺陷，遭受对地雷击，产生的感应火花引爆油气。

【案例 12】 墨西哥城液化气供应中心站爆炸

1984 年 11 月 19 日 5 时 40 分左右，墨西哥首都墨西哥城近郊液化气供应中心站爆炸，站内的 54 座液化气贮罐几乎全部爆炸起火，附近居民受到严重损害。事故中约有 490 人死亡，4000 人负伤，另有 900 人失踪。民房倒塌和部分损坏达 1400 余所，致使 1000 人无家可归。

直接原因 液化气泄漏遇明火或火花；人为破坏。

【案例 13】 成都红光化工厂硝化车间爆炸

1987 年 5 月 3 日，成都红光化工厂硝化车间发生了一起爆炸事故。这次事故炸死 7 人，炸伤 46 人，整个硝化工房和设备被炸毁，共炸毁房屋面积 4281 平方米，直接经济损失 596 万元，间接经济损失近 2000 万元。

直接原因 硝化反应失控，处理措施不当。

【案例 14】 江苏淮阴有机化工厂爆炸

1991 年 10 月 8 日 6 时 50 分，淮阴有机化工厂中试室，一台生产高分子聚醚的 100L 高压反应釜突然发生爆炸，连接釜盖和釜体的紧固螺栓被拉断，质量约为 80kg 的釜盖飞落到离原地 80m 远的地方，高压反应釜上安装的安全阀、压力表等也被炸毁。爆炸产生的气浪将房顶掀掉，约 20m² 的中试室完全倒塌，三名操作人员当场被炸死。

直接原因 加料速度过快、过多，违章改“滴加”为“批加”。

1.3 火灾损失统计

据统计，我国 20 世纪 50 年代的火灾直接财产损失平均每年不到 5000 万元（人民币，下同），60 年代平均每年为 1.2 亿元，70 年代平均每年为 2.5 亿元，80 年代平均每年为 3.2 亿元，90 年代平均每年高达 11.6 亿元。仅 2001 年一年，全国就发生火灾 215863 起，死 2314 人，伤 3752 人，直接财产损失 13.9 亿元（上述火灾统计数字均不包括港、澳、台地区和森林、草原、军队、矿井地下发生的火灾）。

1.3.1 2007 年火灾损失统计

据数据统计，全年共发生火灾 15.9 万起（不含森林、草原、军队、矿井地下部分火灾），

死亡 1418 人, 受伤 863 人, 直接财产损失 9.9 亿元, 与 2006 年相比, 起数、死亡和受伤人数分别下降 30.7%、11.6% 和 40.8%, 损失上升 21.7%。

据分析, 电气和用火不慎引发的火灾占总数一半以上。而亡人火灾多发生在夜间, 以凌晨 2 时至 4 时最为集中。

1.3.2 2008 年火灾损失统计

据统计, 2008 年全国共发生火灾 13.3 万起 (不含森林、草原、军队、矿井地下部分火灾), 死、伤分别为 1385、684 人, 直接财产损失 15 亿元, 与 2007 年相比, 除损失上升 39.3% 外, 起数、死伤人数分别下降 16.2%、2.9% 和 21.6%。主要特点有: 冬、春、夏、秋季节火灾起数分别占 37%、26%、18% 和 19%; 农村和县城集镇火灾所占比重较大 (起数和亡人分别占城乡火灾总数的 57% 和 67%), 住宅和人员密集场所仍是防控重点; 商场、市场和仓储场所火灾损失增加, 是全年火灾损失上升的主因; 夜间火灾亡人率高出白天 3 倍多, 且极易造成多人伤亡; 电气火灾所占比重呈加大趋势。

1.3.3 2009 年火灾损失统计

据统计, 2009 年 1 至 11 月份, 全国共发生火灾 11.7 万起, 死亡 945 人, 受伤 551 人, 直接财产损失 11.6 亿元, 与 2008 年同期相比, 四项数字分别下降 2.5%、21.6%、11.7% 和 20%。火灾各项数据没有随经济社会飞速发展、社会财富急剧增加而呈上升趋势, 这与 2009 年采取的各项强力措施密不可分。

2 燃烧基本原理

2.1 燃烧条件

燃烧是有条件的，它必须是可燃物、氧化剂和点火源三个基本要素同时存在并且相互作用才能发生。也就是说，发生燃烧的条件必须是可燃物质和氧化剂共同存在，并构成一个燃烧系统；同时，要有导致着火的点火源。

2.1.1 燃烧三要素

(1) 可燃物

物质被分成可燃物质、难燃物质和不可燃物质三类。可燃物质是指在火源作用下能被点燃，并且当火源移去后能继续燃烧，直到燃尽的物质，如汽油、木材、纸张等。难燃物质是在火源作用下能被点燃并阴燃，当火源移去后不能继续燃烧的物质，如聚氯乙烯、酚醛塑料等。不可燃物质是在正常情况下不会被点燃的物质，如钢筋、水泥、砖、瓦、灰、砂、石等。

可燃物质是主要研究对象。凡是能与空气、氧气和其他氧化剂发生剧烈氧化反应的物质，都称为可燃物质。可燃物的种类繁多，按其状态不同可分为气态、液态和固态三类，一般是气体较易燃烧，其次是液体，再次是固体；按其组成不同可分为无机可燃物质和有机可燃物质两类。可燃物较多为有机物，少数为无机物。无机可燃物质主要包括某些金属单质，如生产中常见的铝、镁、钠、钾、钙以及某些非金属单质，如磷、硫、碳；此外，还有一氧化碳、氢气等。有机可燃物质种类繁多，大部分都含有碳、氢、氧元素，有些还含有少量的氮、硫、磷等。其中，碳是主要成分，其次是氢，它们在燃烧时放出大量热量。硫和磷的燃烧产物会污染环境，对人体有害。

(2) 氧化剂

凡具有较强的氧化性能，能与可燃物发生氧化反应的物质称为氧化剂。氧气是最常见的一种氧化剂，由于空气中含有 21% 的氧气，因此，人们的生产和生活空间，普遍被这种氧化剂所包围。多数可燃物能在空气中燃烧，也就是说，燃烧的氧化剂这个条件广泛存在着，而且采取防火措施时，在人们工作和生活的场所，它不便被消除。此外，生产中的许多元素和物质如氟、氯、溴、碘以及硝酸盐、氯酸盐、高锰酸盐、过氧化氢、过氯酸盐、金属过氧化物、硝酸铵等，都是氧化剂。

(3) 点火源

具有一定温度和热量的能源，或者说能引起可燃物质着火的热源称为点火源。生产和生活中常用的多种热源都有可能转化为点火源。例如，化学能转化为化合热、分解热、聚合热、着火热、自燃热；电能转化为电阻热、电火花热、电弧热、感应发热、静电发热、雷击发热；机械能转化为摩擦热、压缩热、撞击热；光能转化为热能以及核能转化为热能。同时，这些热源的能量转化可能形成各种高温表面，如灯泡、汽车排气管、暖气管、烟囱等。还有自然界存在的地热、火山爆发等。

2.1.2 燃烧的充分条件

可燃物、助燃物和点火源是构成燃烧的三个要素，缺少其中任何一个，燃烧都不能发生。然而，燃烧反应在温度、压力、组成和点火能等方面都存在着极限值。在某些情况下，如可燃

物未达到一定的含量，助燃物数量不够，点火源不具备足够的温度或热量，那么，即使具备了三个条件，燃烧也不会发生。例如氢气在空气中的含量少于4%时便不能点燃，而一般可燃物质当空气中含氧量低于14%时便不会发生燃烧。又如，锻件加热炉燃煤炭时飞溅出的火星可以点燃油、棉、丝或刨花，但如果溅落在大块木材上，就会发现它很快熄灭了，不能引起木材的燃烧，这是因为火星虽然有超过木材着火的温度，但却缺乏足够热量的缘故。

实际上，燃烧反应在可燃物、氧化剂和点火源等方面都存在着极限值。

因此，燃烧的充分条件有以下几方面。

① 一定的可燃物含量 可燃气体或蒸气只有达到一定的含量时才会发生燃烧。例如，氢气的含量低于4%时，便不能点燃；煤油在20℃时，接触明火也不会燃烧，这是因为在此温度下，煤油蒸气的数量还没有达到燃烧所需含量的缘故。

② 一定的含氧量 几种可燃物质燃烧所需要的最低含氧量见表2-1。

表 2-1 几种可燃物质燃烧所需要的最低含氧量

可燃物名称	最低含氧量/%	可燃物名称	最低含氧量/%
汽油	14.4	乙炔	3.7
乙醇	15.0	氢气	5.9
煤油	15.0	大量棉花	8.0
丙酮	13.0	黄磷	10.0
乙醚	12.0	橡胶屑	12.0
二硫化碳	10.5	蜡烛	16.0

③ 一定的点火源能量 即能引起可燃物质燃烧的最小点火能。一些可燃物的最小点火能见表2-2。

表 2-2 一些可燃物的最小点火能

物质名称	最小点火能/mJ	物质名称	最小点火能/mJ	
			粉尘云	粉尘
汽油	0.2	铝粉	10	1.6
氢(28%~30%)	0.019	合成醇酸树脂	20	80
乙炔	0.019	硼	60	
甲烷(8.5%)	0.28	苯酚树脂	10	40
丙烷(5%~5.5%)	0.26	沥青	20	6
乙醚(5.1%)	0.19	聚乙烯	30	
甲醇(2.24%)	0.215	聚苯乙烯	15	
呋喃(4.4%)	0.23	砂糖	30	
苯(2.7%)	0.55	硫黄	15	1.6
丙酮(5.0%)	1.2	钠	45	0.004
甲苯(2.3%)	2.5	肥皂	60	3.84
乙酸乙烯(4.5%)	0.7			

④ 相互作用 燃烧的三个基本条件需相互作用，燃烧才能发生和持续进行。

综上所述，燃烧必须在充分的条件下才能进行，缺少其中任何一个，燃烧便不会发生。