



◆ 高等学校安全工程系列教材

# 燃烧爆炸理论及应用

RANSHAO BAOZHA LILUN  
JI YINGYONG

潘旭海 主编



化学工业出版社

高等学校安全工程系列教材

# 燃烧爆炸理论及应用

潘旭海 主编

邢志祥 华敏 孙莉 副主编

蒋军成 主审



化学工业出版社

·北京·

本书主要介绍了燃烧与爆炸的基本原理, 以及对于燃烧、爆炸的预防和控制。内容包括燃烧和爆炸的基本理论以及燃烧与爆炸间的区别, 燃烧及其灾害, 气体、液体以及固体等各类物质的燃烧, 谢苗诺夫自燃理论、弗兰克-卡门涅茨基自燃理论、链式反应着火理论等, 爆炸及其灾害, 火灾爆炸的预防及控制。

本书系统性强、内容充实、实用性强, 可作为高等院校安全工程、消防工程或化工类专业教材, 也可作为化工安全设计人员、化工生产技术人员、消防工程技术人员、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

燃烧爆炸理论及应用/潘旭海主编. — 化学工业出版社, 2015. 1

高等学校安全工程系列教材

ISBN 978-7-122-21356-3

I. ①燃… II. ①潘… III. ①燃烧理论-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 (2014) 第 161390 号

---

责任编辑: 杜进祥

文字编辑: 向东

责任校对: 宋玮

装帧设计: 孙远博

---

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: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 326 千字 2015 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: 32.00 元

版权所有 违者必究



## 前言

实际生活与生产中，燃烧无时无刻在发生，而爆炸也难以避免，一旦发生爆炸，就可能造成极大的人员伤亡和财产损失，特别是在化工生产过程中，如果生产技术人员对燃烧、爆炸的基本原理和预防措施有所研究，许多事故是可以预见并避免的。本书的主旨在于介绍燃烧与爆炸的基本原理，并对爆炸加以预防和控制。

本书分为六章。第一章，主要介绍燃烧和爆炸的基本理论，以及燃烧与爆炸的区别；第二章主要介绍燃烧及其灾害；第三章主要介绍各类物质的燃烧，包括气体、液体以及固体的燃烧；第四章主要介绍着火理论，包括对谢苗诺夫自燃理论、弗兰克-卡门涅茨基自燃理论及其应用、链式反应着火理论；第五章主要介绍了爆炸及其灾害；第六章主要介绍火灾爆炸的预防及控制。

本书在吸收国内同类教材优点的基础上，结合国外知名教材，将国外在该领域内的最新理论研究、可操作性强的防火防爆技术及方法等引入到本书中，使内容既做到注重理论知识的总结与传授，又注重实践经验的总结，同时又能反映学科前沿。

本书可作为高等院校安全工程、消防工程或化工类专业本科生化工安全课程的必修课或选修课教材，也可作为从事化工安全设计和化工生产技术与管理的专业人员的参考工具。

本书第一、第五章由南京工业大学潘旭海教授编写，第二章由浙江工业大学孙莉副教授编写，第三、第四章由常州大学邢志祥教授编写，第六章由南京工业大学华敏副教授编写，参加本书编写的还有刘珊珊、张璐、蒯志华，全书由潘旭海教授负责统稿。

在本书编写过程中，南京工业大学副校长、安全科学与工程学科带头人蒋军成教授提出了许多有益的建议和意见，并对本书进行了审阅，在此表示诚挚的谢意。在本书的整个写作和出版过程中，得到化学工业出版社的有力支持，在此一并致谢。

由于燃烧与爆炸理论的知识面和学科范围较广，限于笔者水平，书中不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正。

编者  
2014年5月



# 目录

## 第一章 绪论 ..... 1

第一节 燃烧.....	1
一、人类对燃烧的认识过程 .....	1
二、燃烧与人类文明的关系 .....	1
三、燃烧概述 .....	2
第二节 爆炸.....	3
一、爆炸概述 .....	3
二、燃烧与爆炸的区别 .....	4
三、爆炸的分类 .....	4
四、基本概念 .....	4
思考题 .....	5

## 第二章 燃烧及其灾害 ..... 6

第一节 燃烧条件 .....	6
一、燃烧的定义 .....	6
二、燃烧条件 .....	6
三、燃烧条件的应用 .....	10
第二节 物质燃烧历程及形式 .....	17
一、燃烧历程 .....	17
二、燃烧的形式 .....	18
第三节 燃烧的种类 .....	19
一、闪燃及闪点 .....	19
二、点燃及燃点 .....	21
三、自燃及自燃点 .....	22
四、爆炸 .....	25
第四节 燃烧机理 .....	26
一、活化能理论 .....	26
二、过氧化物理论 .....	27
三、链式反应理论 .....	27

第五节 燃烧极限及计算 .....	29
一、燃烧极限的概念 .....	29
二、燃烧极限的影响因素 .....	29
三、燃烧极限的估算 .....	33
第六节 火灾 .....	35
一、池火灾 .....	36
二、喷射火灾 .....	41
思考题 .....	45

### 第三章 物质的燃烧 ..... 46

第一节 气体的燃烧 .....	46
一、气体的着火 .....	46
二、气体燃烧 .....	47
第二节 液体的燃烧 .....	53
一、液体的着火 .....	53
二、液体火灾蔓延 .....	64
第三节 固体的燃烧 .....	75
一、固体可燃物的着火 .....	75
二、固体火灾蔓延 .....	78
思考题 .....	81

### 第四章 着火理论 ..... 82

第一节 热自燃理论 .....	83
一、谢苗诺夫自燃理论 .....	83
二、弗兰克-卡门涅茨基自燃理论 .....	91
第二节 链式反应着火理论 .....	97
一、链式反应过程 .....	97
二、链式反应分类 .....	98
三、链式反应着火条件 .....	99
四、链式反应理论中的着火感应期 .....	101
五、链式反应对着火极限的影响 .....	101
思考题 .....	102

### 第五章 爆炸及其灾害 ..... 103

第一节 爆燃及爆轰 .....	103
一、爆燃 .....	103
二、爆轰 .....	104

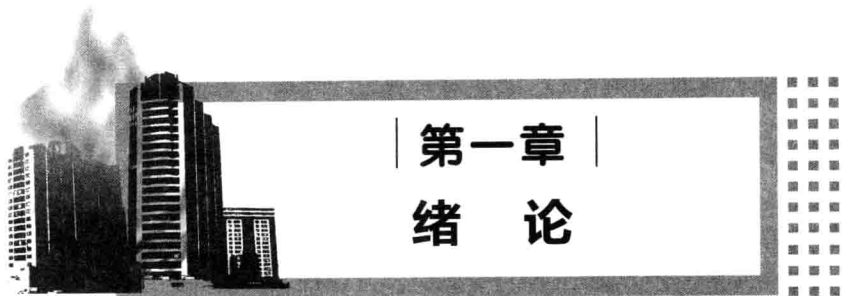
三、爆燃向爆轰的转变 .....	106
四、爆燃和爆轰的破坏机理 .....	106
第二节 蒸气云爆炸 .....	107
一、蒸气云爆炸基本概念 .....	107
二、成因及特点 .....	108
三、危害及防护 .....	110
第三节 沸腾液体扩展蒸气爆炸 .....	111
一、沸腾液体扩展蒸气爆炸基本概念 .....	111
二、典型形成过程 .....	111
三、危害及防护 .....	112
第四节 喷雾爆炸 .....	113
第五节 粉尘爆炸 .....	114
一、粉尘基础知识 .....	115
二、粉尘爆炸机理及影响因素 .....	118
三、粉尘爆炸和气体爆炸的比较 .....	123
第六节 爆炸温度、压力和强度 .....	128
一、爆炸温度和压力 .....	128
二、爆炸强度 .....	130
第七节 爆炸灾害 .....	134
一、爆炸冲击波及其破坏 .....	134
二、爆炸抛射物的破坏 .....	141
思考题 .....	141

## **第六章 火灾爆炸的预防及控制 ..... 142**

第一节 着火源的控制 .....	142
一、明火及高温表面 .....	142
二、摩擦与撞击 .....	143
三、绝热压缩 .....	144
四、自氧化 .....	145
五、电气火花 .....	145
第二节 静电及其控制 .....	148
一、静电的产生 .....	148
二、静电的积聚及其影响因素 .....	149
三、静电放电 .....	151
四、流动电流 .....	152
五、静电电压差 .....	154
六、电荷平衡 .....	157
七、静电的危害 .....	160
八、静电的控制 .....	162

第三节	惰化	167
第四节	可燃性图表及其应用	173
一、	可燃性图表	173
二、	可燃性图表的应用	180
第五节	通风	185
一、	露天工厂	185
二、	非露天工厂	185
第六节	火灾和爆炸蔓延的控制	187
一、	隔离和远距离操纵	187
二、	防火与防爆安全装置	188
第七节	爆炸的防护	196
一、	爆炸封锁	196
二、	爆炸抑制	197
	思考题	198





## 第一节 燃 烧

### 一、人类对燃烧的认识过程

燃烧俗称着火。早在远古时代，人们就开始用火了。然而，人类真正认识火的本质，科学地解释这一现象，则是从氧的发现开始的，至今只有两百多年的历史。

在古代，人类在用火的同时产生了许多有关火的传说，例如我国的五行说（金、木、水、火、土）、古希腊的四元说（水、土、火、气）、古印度的四大说（地、水、火、风）等，其中都有火。在古人看来，火是万物之源，火能化育万物，但由于科学技术和生产力水平的限制，在那时人们不可能再进一步研究火的本质。

到了近代，随着科学技术的发展和生产力水平的不断提高，火在工业技术中的应用日益广泛，例如制陶、冶金等，这就使得人们迫切地想要弄清火的本质，于是产生了种种对燃烧现象的解释，其中影响最深、流行时间最长的一种学说是欧洲的“燃素说”。

燃素说认为，火是由无数细小的微粒构成的物质实体，这种火的微粒就是燃素。按照燃素说，所有的可燃物质都含有燃素，并在燃烧时释放出来，变成灰烬；不含燃素的物质不能燃烧；物质燃烧之所以需要空气，是因为空气能够吸收燃素。

燃素说曾解释过许多化学现象，并对科学的发展起到一定的积极作用，但燃素说毕竟是一种凭空捏造出来的学说，因此它不能解释全部的燃烧现象，也必定经不住实践的检验。燃素说在欧洲流行了一个多世纪，虽然许多人对它提出了质疑，但谁也提不出更好的理论，直到18世纪下半叶，氧被发现后，燃烧的秘密才终于被揭开，从而也宣告了燃素说的破产。

1774年，英国化学家普利斯特里在实验室发现了氧，在此基础上，法国化学家拉瓦锡进行了大量的实验，通过对实验结果的归纳和分析，终于在人类历史上第一次提出了科学的燃烧学说——燃烧的氧学说，并于1777年公布于世。这一学说的中心思想是，燃烧是可燃物与氧的化合反应，同时放出光和热。

现代化学表明，燃烧是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/或发烟现象。可见，燃烧的氧学说距离现代燃烧学说只有一步之遥了。

### 二、燃烧与人类文明的关系

火对人类的发展起了巨大的推动作用。首先，因为利用了火，人类才吃上了熟食，改变了茹毛饮血的生活，使人的大脑逐渐发达；其次，火的利用，极大地推动了科学技术的发展。最初，火被用来酿造、制陶；稍后，火又被用于冶炼；到了19世纪，由燃烧提供动力

的蒸汽机的发明和广泛使用，促进了近代工业和资本主义的发展。直到今日，现代科技高度发达，但不论是人们的衣食住行，还是工农业生产的发展，都离不开火。总之，人类文明是伴随着火的应用而发展的。可以说，没有火的利用，就没有人类今天的物质文明和精神文明，所以说，一部人类用火史就是一部人类文明进步史。

然而世界上的一切事物都是一分为二的，火虽然给人类带来了现代文明，但燃烧一旦失去控制，又会给人类带来灾难。这种失去控制的燃烧所造成的灾害叫作火灾。一般而言，社会越发展，物质越丰富，火灾发生的频率和造成的损失就越大。

火灾是国内外安全工作者特别关心的问题之一。目前世界上每年都会发生各种情况的火灾，给社会经济、人民生命财产造成无法估量的损失。燃烧学是研究火灾防治方法及技术的基础，同时，燃烧在工业部门有着广泛的应用背景。在世界总体能源结构中，以燃烧方式提供的能源所占比例高达80%~85%。燃烧技术不仅在冶金、电力、机械、化工、轻工、交通、农机等生产领域得到了广泛的应用，而且还渗透到日常生活的各个方面（如抽烟、烧饭、汽车等）。对于航空、航天、兵器这些特殊的技术领域，更是完全建筑在以燃烧技术为核心的综合技术基础之上，可以说没有燃烧就没有我们的现代文明。强化燃烧、节约能源、防火灭火、防止污染这四大问题是当今燃烧技术发展最迫切、最热门的课题，因此，燃烧学是安全工程专业及其他与燃烧过程有关专业的一门重要技术基础课。学好本课程对拓宽知识面和培养综合能力，以及在最大限度地利用燃烧使之为人服务的同时，防止火灾的发生，以及迅速地扑灭已发生的火灾，有着极其重要的意义。

从化学观点看，在燃烧过程中，原来物质的分子结构遭到破坏，原子中的外层电子重新组合，经过一系列中间产物的变迁，最后产生了新的物质，即燃烧产物。在化学反应中，总的位能降低了，即所谓化学能降低了，这部分能量大都以热能和光能的形式释放出来，表面上形成了火焰。从物理观点看，首先，燃烧过程总是发生在物质流动系统中，这种流动可能是均相流也可能是多相流，流态可能是层流也可能是湍流；其次，燃烧现象总是在不均匀物质场条件下进行，多种物质组分间的混合、扩散在不断地进行着，甚至外界环境（如电磁场、重力场）对燃烧还会产生显著地影响，因此燃烧是一种物理和化学的综合变化过程，是一个复杂的不断变化着的动态过程，它是一门交叉学科。学习燃烧既要求有化学热力学、化学反应机理、化学平衡及化学反应动力学的一些基本知识，又要求对流体力学、气体动力学、传热与传质等学科的知识有一定的了解。

由于燃烧的复杂性，人们通常只按照自己的专业需要去研究燃烧中的某一方面的问题，例如：

化学家——研究燃烧的反应机构、反应速率、反应程度、燃烧产物的生成机理等问题；

热能工程师——研究锅炉等燃烧设备的设计，煤等燃料的燃烧技术及燃烧中的流体力学、传热、传质等热物理现象，燃烧设备的管理使用，燃烧能量的合理使用等；

汽车发动机专家——研究内燃机的设计，汽油、柴油等燃料的间隙式燃烧技术及做功效率等；

飞机发动机专家——研究航空发动机，航空燃料的稳态及非稳态燃烧技术及推进效率等；

火箭发动机专家——研究火箭发动机，推进剂的稳态及非稳态燃烧技术及推进效率等；

安全专家——研究火灾的防治，各种可燃物的着火、燃烧、爆炸及火焰熄灭等。

### 三、燃烧概述

燃烧是可燃物质与助燃物质（氧或其他助燃物质）发生的一种发光、发热的氧化反应。

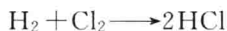
在化学反应中，失掉电子的物质被氧化，获得电子的物质被还原。所以，氧化反应并不局限于与氧的反应，例如，氢气在氯气中燃烧生成氯化氢，氢原子失掉一个电子被氧化，氯原子获得一个电子被还原。类似地，金属钠在氯气中燃烧，炽热的铁在氯气中燃烧，都是激烈的氧化反应，并伴有光和热的发生。金属和酸反应生成盐也是氧化反应，但没有同时发光、发热，所以不能称作燃烧。灯泡中的灯丝通电后同时发光、发热，但并非氧化反应，所以也不能称作燃烧，只有同时发光、发热的氧化反应才被界定为燃烧。

燃烧是最典型的强烈的氧化反应，此外与氧化反应相类似的氟化、氯化、溴化等反应也是燃烧现象。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，而另一类组分就称为燃料。前者如氧、空气、发烟硝酸、双氧水等，后者如炭、氢气、汽油、煤油、天然气、木材、钾、镁、硫、硼等。此外，推进剂和火药则是靠药剂自身既提供氧化剂又提供可燃物的一种特殊材料。

可燃物在燃烧过程中，生成了与原来的物质完全不同的新物质。例如：



燃烧不仅在空气（氧）存在时能发生，有的可燃物在其他氧化剂中也能发生燃烧。例如：



镁屑甚至能在二氧化碳中燃烧。在日常生活、生产中看到的燃烧现象，大都是可燃物与空气（氧）或其他氧化剂进行剧烈化合而发生的放热发光现象。实际上，燃烧不仅可以是化合反应，也可以是分解反应。从本质上讲，燃烧是剧烈的氧化还原反应。

随着现代科学的发展，人们对燃烧的认识不断深化，现在普遍认为，燃烧是一种自由基的链式反应。可燃物质的分子在高温或光照等外因作用下，吸收能量而活化，分解为活泼的原子或原子团，它们不同于普通的原子或原子团，带有不成对的电子，这种原子或原子团称为自由基。这些自由基非常活泼，一旦产生即诱发其他分子迅速地、一个接一个地自由分解，生成大量新的自由基，从而形成了蔓延扩张、循环传递的链式反应过程，直到不再产生新的自由基为止。

## 第二节 爆 炸

### 一、爆炸概述

爆炸是物质发生急剧的物理、化学变化，在瞬间释放出大量能量并伴有巨大声响的过程。在爆炸过程中，爆炸物质所含的能量快速释放，变为对爆炸物质本身、爆炸产物及周围介质的机械能。物质爆炸时，大量能量在极短的时间内，在有限体积内突然释放并聚积，形成高温高压，对邻近介质形成急剧的压力突变并引起随后的复杂运动。爆炸介质在压力作用下，表现出不寻常的运动或机械破坏效应，以及爆炸介质受振动而产生的音响效应。

爆炸常伴随发热、发光、高压、真空、电离等现象，并且具有很大的破坏作用。爆炸的破坏作用与爆炸物质的数量和性质、爆炸时的条件以及爆炸位置等因素有关。如果爆炸发生在均匀介质的自由空间，在以爆炸点为中心的一定范围内，爆炸力的传播是均匀的，并使这个范围内的物体粉碎、飞散。

爆炸的威力是巨大的，在遍及爆炸起作用的整个区域内，有一种令物体振荡、使之松散的力量。爆炸发生时，爆炸的冲击波最初使气压上升，随后气压下降使空气振动产生局部真

空，呈现出所谓的吸收作用。由于爆炸的冲击波呈升降交替的波状气压向四周扩散，从而造成附近建筑物的振荡破坏。

化工装置、机械设备、容器等爆炸后，变成碎片飞散出去会在相当大的范围内造成危害。化工生产中属于爆炸碎片造成的伤亡占很大比例。爆炸碎片的飞散距离一般可达到100~500m。

爆炸气体扩散通常在爆炸的瞬间完成，对一般可燃物质不致造成火灾，而且爆炸冲击波有时能起灭火作用。但是爆炸的余热或余火，会点燃从破损设备中不断流出的可燃液体、蒸气而造成火灾。

## 二、燃烧与爆炸的区别

爆炸属于一种特殊的燃烧形式，火灾和爆炸之间的主要区别是能量释放的速率。火灾中能量释放很慢，而爆炸释放能量很快，通常是微秒级的。火灾可能由爆炸引起，爆炸也可能由火灾引起。

能量释放速率影响事故后果的一个很好的例子，就是通常的汽车轮胎。轮胎中的压缩空气含有一定的能量，如果能量通过喷嘴缓慢释放，轮胎就无害地缩小；如果轮胎突然破裂，轮胎内的压缩空气所有能量迅速释放，就会导致很危险的爆炸。

## 三、爆炸的分类

根据爆炸发生原因的不同，可将其分为物理爆炸、化学爆炸和核爆炸三大类。在研究化工厂防火防爆技术中，通常只谈及物理爆炸和化学爆炸。

物理爆炸由物理变化所致，其特征是爆炸前后系统内物质的化学组成及化学性质均不发生变化。物理性爆炸主要是指压缩气体、液化气体和过热液体在压力容器内，由于某种原因使容器承受不住压力而破裂，内部物质迅速膨胀并释放大量能量的过程。例如蒸汽锅炉因水快速汽化，压力超过设备所能承受的强度而产生的锅炉爆炸；装有压缩气体的钢瓶受热爆炸等。

化学爆炸是由化学变化造成的，其特征是爆炸前后物质的化学组成及化学性质都发生了变化。化学爆炸可以是可燃气体和助燃气体的混合物遇到火源而引起的（如煤矿瓦斯爆炸）；也可以是可燃粉末与空气的混合物遇到火源而引起的（如粉尘爆炸）；但更多的是炸药以及爆炸性物品所引起的爆炸。化学爆炸的主要特点是：反应速率极快、放出大量热量、产生大量气体，只有上述三者同时具备的化学反应才能形成爆炸。

## 四、基本概念

(1) 机械爆炸 这种爆炸是由装有高压非反应性气体的容器的突然失效造成的。

(2) 爆燃 在这种爆炸中，反应前沿的移动速度低于声音在未反应介质中的传播速度。

(3) 爆轰 在这种爆炸中，反应前沿的移动速度高于声音在未反应介质中的传播速度。

(4) 受限爆炸 这种爆炸发生在容器或建筑物中。这种情况很普遍，并且通常导致建筑物中人员受到伤害和巨大的财产损失。

(5) 无约束爆炸 无约束爆炸发生在空旷地区。这种类型的爆炸通常是由可燃性气体泄漏引起的。气体扩散并同空气混合，直到遇到引燃源。无约束爆炸比受限爆炸少，因为爆炸性物质常常被风稀释到低于燃烧下限（LFL）。这些爆炸都是破坏性的，因为通常会涉及大量的气体和较大的区域。

(6) 沸腾液体扩展蒸气爆炸（BLEVE） 如果装有温度高于其在大气压下的沸点温度的

液体的储罐破裂，就会发生蒸气爆炸。紧接着的是容器内大部分物质的爆炸性汽化；如果汽化后形成的蒸气云是可燃的，还会发生燃烧或爆炸，当外部火焰烘烤装有易挥发性物质的储罐时，这种类型的爆炸就会发生。随着储罐内物质温度的升高，储罐内液体的蒸气压增加，由于受到烘烤，储罐的结构完整性降低。如果储罐破裂，过热液体就会爆炸性地汽化。

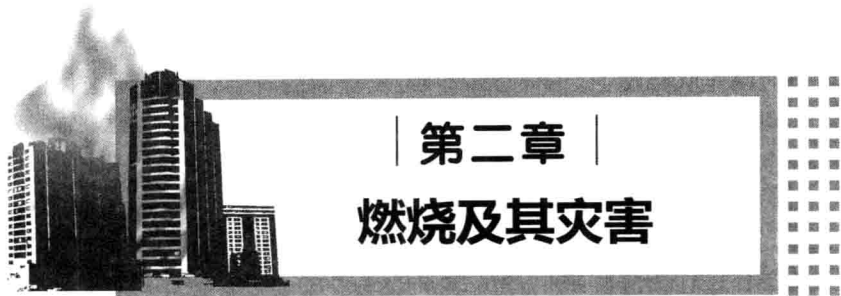
(7) 粉尘爆炸 这种爆炸是由纤细的固体颗粒的快速燃烧引起的。许多固体物质（包括常见的金属，如铁和铝）变成纤细的粉末后就成了易燃物。

(8) 冲击波 是沿气体移动的不连贯的压力波。敞开空间中的冲击波后面是强烈的大风；冲击波与风结合后称为爆炸波。冲击波中的压力增加得很快。因此，其过程几乎是绝热的。

(9) 超压 超压是由冲击波引起的作用在物体上的压力。

### 思 考 题

1. 什么是燃烧的氧学说？
2. 什么是燃烧？什么是爆炸？两者有什么区别？
3. 化学爆炸三要素是什么？



## 第二章 燃烧及其灾害

### 第一节 燃烧条件

#### 一、燃烧的定义

燃烧俗称着火，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/或发烟的现象。燃烧具有三个特征，即化学反应、放热和发光。在化学反应中，失掉电子的物质被氧化，获得电子的物质被还原，所以，氧化反应并不限于同氧的反应。本书所指的燃烧除特别说明外，均指可燃物与空气中的氧混合所发生的燃烧反应。

#### 二、燃烧条件

##### (一) 燃烧三角形

燃烧的本质因素是燃料、氧化剂和引燃源，这些因素可通过如图 2-1 所示的燃烧三角形进行阐明，这三个因素就是我们通常所说的燃烧三要素。

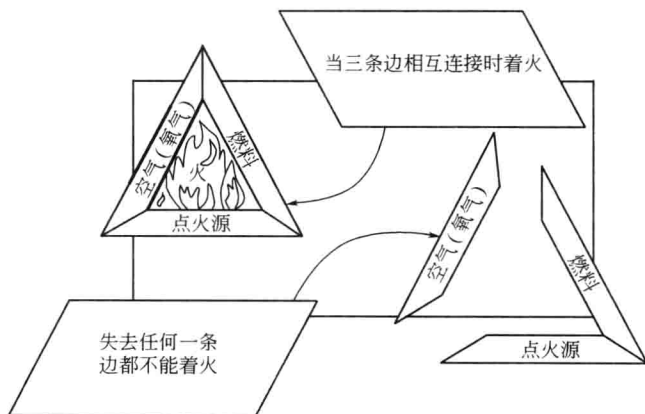


图 2-1 燃烧三角形

当燃料、氧化剂和引燃源处于所需要的水平时，燃烧就会发生。如果没有燃料或燃料量不足、没有氧化剂或氧化剂量不足、引燃源的能量不足以引发燃烧时，燃烧均不会发生。也就是说，燃烧三要素仅仅是燃烧发生的必要条件，而不是充分条件。

##### 1. 燃烧极限

在可燃性气体混合物中，可燃气与空气（或氧气）的比例只在一定的范围内才可以发

生燃烧。高于或低于这个范围都不会燃烧。通常，把 1atm (101325Pa) 下可燃气体在其与空气的混合物中能发生燃烧的最低体积浓度称为燃烧下限 (lower flammability limit, LFL)，而将最高体积浓度称为燃烧上限 (upper flammability limit, UFL)。在燃烧上限与燃烧下限之间的浓度，则称为可燃物的燃烧浓度范围。

燃烧上限和燃烧下限的火灾危险性与具体的操作条件有关。正压操作情况下应该严防下限较低的危险物质，燃烧下限相对较低的物质少量泄漏就能达到燃烧浓度范围；负压操作应该严防上限低危险物质，因为容器稍有泄漏，少量空气的进入就可以达到燃烧浓度范围。

表 2-1 列出某些可燃性气体和蒸气的燃烧极限数据。

表 2-1 某些可燃性气体和蒸气的燃烧极限数据

物质	下限(LFL) 体积分数/%	上限(UFL) 体积分数/%	物质	下限(LFL) 体积分数/%	上限(UFL) 体积分数/%
碳氢化合物			乙酸类		
甲烷	5.0	15	乙酸	5.4	—
乙烷	3.0	12.4	乙酸乙酯	2.2	11.0
乙烯	2.7	36	乙酸戊酯	1.0	7.1
丙烷	2.1	9.5	乙烯基乙酸酯	2.6	—
丁烷	1.8	8.4	醇类		
1-丁烯	1.6	10	甲醇	6.7	36
1,3-丁二烯	2.0	12.0	乙醇	3.3	19
正戊烷	1.4	7.8	丙醇	2.2	14
己烷	1.2	7.4	异丙醇	2.0	11.8
庚烷	1.05	6.7	1-丁醇	1.7	12.0
乙炔	2.5	100	环己醇	1.2	—
丙烯	2.4	11	醚类		
环状化合物			二乙醚	1.9	36
甲苯	1.2	7.1	二甲醚	3.4	27
二甲苯	1.1	6.4	甲基乙基醚	2.2	—
苯乙烯	1.1	6.1	酮类		
环丙烷	2.4	10.4	丙酮	2.6	13
环己烷	1.3	7.8	甲基乙基酮	1.4	10
环庚烷	1.1	6.7	醛类		
甲基环己烷	1.1	6.7	乙醛	4.0	60
氧化乙烯	3.6	100	丙醛	2.3	21
氧化丙烯	2.8	37	其他化合物		
一氯化物			一氧化碳	12.5	74
氯甲烷	7	—	硫化氢	4.0	44
氯乙烯	3.6	33	氨	15	28
氯乙烷	3.8	—	氢	4.0	75

必须指出，在实际使用时，人们习惯上将燃烧极限与爆炸极限看成是一回事，互换使用，即燃烧上限也称为爆炸上限，燃烧下限也称为爆炸下限，事实上这是不准确的，对有些物质，达到燃烧的最低体积浓度和达到爆炸的最低体积浓度是不一样的，对有些物质达到最高体积浓度的数值也是不一样的，如氢气在空气中的体积浓度达到 4% 就可以燃烧，但要达到 18.3% 才发生爆炸。表 2-2 列出了一些燃烧极限和爆炸极限差别较大的常见气体。

表 2-2 燃烧极限和爆炸极限差别较大的常见气体比较

混合物	下限(LFL), 体积分数/%		上限(UFL), 体积分数/%	
	燃烧	爆炸	爆炸	燃烧
H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	4.65	15	90	94
H <sub>2</sub> -空气	4.0	18.3	59	74
CO-O <sub>2</sub> (潮湿)	15.5	38	90	93.9
(CO+H <sub>2</sub> )-空气	12.5	19	58.7	74.2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> -空气	2.5	4.2	50	80
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O(乙醚)-O <sub>2</sub>	2.1	2.6	40	82
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O-空气	1.85	2.8	4.5	36.5

## 2. 极限氧浓度 (LOC)

燃烧三角形表明一般没有氧是不会发生燃烧的。但对可燃性气体而言,并不是在任何氧浓度下都可以发生燃烧,存在一个可引起燃烧的最低氧浓度,即极限氧浓度(LOC)。低于极限氧浓度时,燃烧反应就不会发生,因此极限氧浓度也称为最小氧浓度(MOC),或者最大安全氧浓度(MSOC)。从安全角度考虑可燃性气体的防火防爆时,极限氧浓度就是可燃混合气体中氧的最高允许浓度。对可燃性气体常采取的防火防爆措施之一就是混合体系提高惰性气体的浓度,从而降低氧的浓度,使其降低至极限氧浓度以下,这种通过稀释氧浓度而防火防爆的方法被称为可燃气体的惰化防爆。各种可燃性气体的极限氧浓度在不同的惰性气体中是不同的。表 2-3 列出了部分可燃气体的极限氧浓度。

表 2-3 部分可燃气体的极限氧浓度 (体积分数)

单位: %

气体或蒸气	N <sub>2</sub> /Air	CO <sub>2</sub> /Air	气体或蒸气	N <sub>2</sub> /Air	CO <sub>2</sub> /Air
甲烷	12	14.5	煤油	10(150℃)	13(150℃)
乙烷	11	13.5	天然气	12	14.5
丙烷	11.5	14.5	二氯甲烷	19(30℃)	—
正-丁烷	12	14.5		17(100℃)	—
异丁烷	12	15	1,2-二氯乙烷	13	—
正-戊烷	12	14.5		11.5(100℃)	—
异戊烷	12	14.5	三氯乙烷	14	—
正-己烷	12	14.5	三氯乙烯	9(100℃)	—
正-庚烷	11.5	14.5	丙酮	11.5	14
乙烯	10	11.5	二硫化碳	5	7.5
丙烯	11.5	14	一氧化碳	5.5	5.5
1-丁烯	11.5	14	乙醇	10.5	13
异丁烯	12	15	乙醚	10.5	13
丁二烯	10.5	13	氢气	5	5.2
3-甲基-1-丁烯	11.5	14	硫化氢	7.5	11.5
苯	11.4	14	甲酸异丁酯	12.5	15
甲苯	9.5	—	甲醇	10	12
苯乙烯	9.0	—	乙酸甲酯	11	13.5
乙苯	9.0	—	汽油		
甲基苯乙烯	9.0	—	(73/100)	12	15
二乙基苯	8.5	—	(100/130)	12	15
环丙烷	11.5	14	(115/145)	12	14.5



极限氧浓度表示燃烧反应时氧气的量占燃烧反应物质总量的百分数，因此通过简单变换，可以由燃烧下限来计算极限氧浓度。

$$\text{LOC} = \frac{\text{氧气的量}}{\text{燃烧反应物总量}} = \frac{\text{燃料的量}}{\text{燃烧反应物总量}} \times \frac{\text{氧气的量}}{\text{燃料的量}} = \text{LFL} \frac{\text{氧气的量}}{\text{燃料的量}} = \text{LFL}(z) \quad (2-1)$$

式中， $z$  为燃烧反应中氧的化学当量系数。



$z$  可以通过具体化合物的燃烧化学反应方程来确定。

**【例 2-1】** 估算丁烷 ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) 的 LOC。

解 该反应的化学计算是：



已知丁烷的 LFL 为 1.9%。根据式 (2-1) 有：

$$\text{LOC} = \frac{\text{燃料的物质的量}}{\text{总物质的量}} \times \frac{\text{氧气的物质的量}}{\text{燃料的物质的量}} = \text{LFL} \frac{\text{氧气的物质的量}}{\text{燃料的物质的量}}$$

代入有关数据，得到：

$$\text{LOC} = 1.9\% \times 6.5 = 12.4\%$$

通过增加氮气、二氧化碳或水蒸气，直到氧浓度小于 12.4%，阻止丁烷的燃烧。然而，并不建议添加水蒸气，因为在任何情况下，冷凝水将会把氧气浓度重新带回可燃范围之内。

### 3. 最小引燃能 (MIE)

各种可燃性物质或爆炸性混合物，包括粉尘，在外界火源作用下被引燃或引爆时都存在一个最小的引燃能量或点燃能量，称为最小引燃能 (MIE)。低于这个能量就不会发生燃烧或爆炸。因此，最小引燃能是表示可燃性混合物爆炸危险性的一项重要参数，该能量越小爆炸危险性就越大。表 2-4 列出一些化合物的最小引燃能。

有实验研究表明混合物的压力增加时引燃能降低，而且氧气浓度增加时引燃能随之减小，表明引燃能随氧气浓度降低而减小。此外，粉尘的引燃能比可燃性气体的引燃能要高

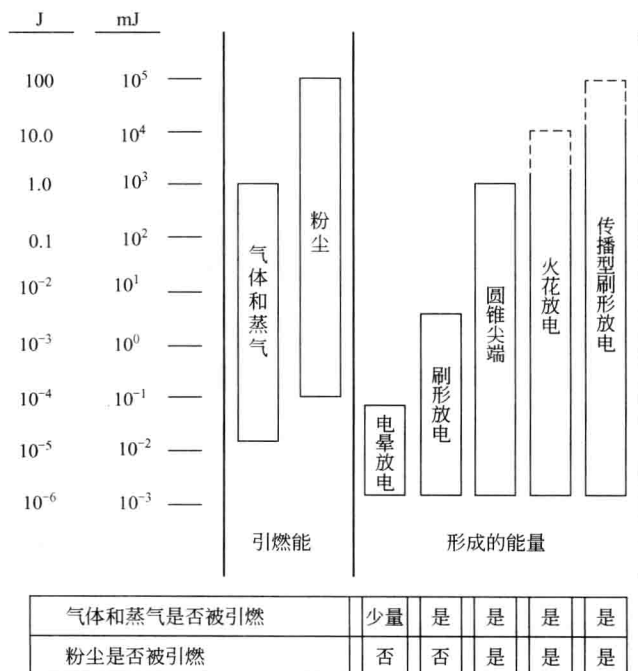


图 2-2 引燃源释放能量与可燃性气体及粉尘最小引燃能的比较