



# 燃烧与爆炸

胡双启 张景林 编著

兵器工业出版社

7

X 928.7

1

号B40字登录 (京)

内 容 简 介

# 燃 烧 与 爆 炸

胡双启 张景林 编著

兵器工业出版社

1982年8月第1版 1982年8月第1次印刷

印数: 1-1000册 定价: 3.80元

ISBN 7-80038-242-0/TC·13

(京) 新登字049号

## 内 容 简 介

本书从安全技术角度出发,系统地介绍了各类燃爆危险性物质燃烧和爆炸的基本理论。主要内容包括:可燃性混合气体、分解爆炸性气体、液化气体的燃烧与爆炸;可燃液体和固体的燃烧;可燃粉尘的燃烧与爆炸;爆炸性物质的燃烧与爆炸;自燃性物质的热自燃与热爆炸。同时,本书就有关火灾与爆炸的安全防范技术也作了较详尽的介绍。

本书可作为大专院校安全工程专业的教学用书或教学参考书,也可供国防、化工、煤炭、石油、轻纺、粮食及其他各个行业的安全技术人员和管理干部参考。

## 燃烧与爆炸

胡双启 张景林 编著

\*

兵器工业出版社 出版发行

(北京市海淀区车道沟10号)

太原机械学院印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.84 字数: 268千字

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数: 1—1000册 定价: 9.80元

ISBN 7-80038-545-0/TQ·16

## 前 言

在煤炭、石油、化工和国防工业生产中，绝大多数灾害事故都是由火灾和爆炸所带来的，而且各类事故中，也数火灾和爆炸所带来的损失最为惨重。因此，研究火灾和爆炸的有关规律和特点就成了安全工程专业的一门主要课程。

火灾和爆炸灾害不仅在煤炭、石油、化工和国防工业生产中经常发生，而且在冶金、铸造、机械、制材、建筑、纺织、粮食、食品、饲料加工、印刷等几乎所有的工业部门都可能发生，而且火灾和爆炸本身是一对很复杂的问题，学习这门课必须具有各方面的知识，包括力学，化学、机械、电、建筑、医学、心理学等。对于如此复杂的问题要想在有限的篇幅里包罗万象是不可能的。因此，本书将以燃烧和化学爆炸为主题尽可能深入浅出地对各种常见燃爆危险性物质的燃烧和爆炸的基本知识和基本理论进行阐述，为立志于更深入研究燃烧和爆炸理论的人员和实施具体安全措施人员打下初步理论基础。殷切希望本书能起到抛砖引玉的作用。

本书第一、二、三、四、五、七章由胡双启编写，第六、八章由张景林编写。书稿由金泽渊高工审定，由国防工业出版社赵锡正副编审进行编辑加工，在此一并致以衷心感谢。

编 著 者

1992年7月

# 目 录

<b>第一章 燃烧与爆炸概论</b> .....	1
§ 1.1 燃烧现象与爆炸现象.....	1
§ 1.2 燃烧三要素和爆炸三要素.....	2
§ 1.3 燃烧和爆炸的种类.....	4
§ 1.3.1 燃烧.....	4
§ 1.3.2 爆炸.....	13
§ 1.4 燃爆危险性物质的种类.....	17
§ 1.5 着火源的种类.....	19
<b>第二章 气体燃烧与爆炸</b> .....	24
§ 2.1 可燃性混合气体的燃烧与爆炸.....	24
§ 2.1.1 气体的燃烧形式.....	24
§ 2.1.2 理论氧含量与理论混合比.....	26
§ 2.1.3 爆炸极限.....	28
§ 2.1.4 可燃性混合气体的发火条件.....	56
§ 2.1.5 气体爆炸效应.....	67
§ 2.1.6 三成份系列混合气体爆炸范围图.....	80
§ 2.2 气体分解爆炸.....	87
§ 2.2.1 乙炔分解爆炸.....	87
§ 2.2.2 乙烯分解爆炸.....	89
§ 2.2.3 氧化乙烯的分解爆炸.....	89
§ 2.3 蒸气云及液化气罐的爆炸.....	91
§ 2.3.1 蒸气云爆炸.....	91
§ 2.3.2 液化气罐爆炸.....	93

**第三章 可燃液体和固体的燃烧**..... 118

§ 3.1 液体的燃烧.....118

§ 3.1.1 燃烧机理.....118

§ 3.1.2 闪点.....123

§ 3.1.3 燃点和自燃点.....126

§ 3.1.4 液体理化性质与火灾的关系.....127

§ 3.1.5 池火灾.....128

§ 3.2 固体的燃烧.....129

§ 3.2.1 燃烧机理.....129

§ 3.2.2 自燃温度.....130

§ 3.3.3 易燃固体的分类.....131

**第四章 粉尘爆炸与粉尘火灾**..... 133

§ 4.1 粉尘爆炸概述.....133

§ 4.2 粉尘爆炸机理.....138

§ 4.3 影响粉尘爆炸的因素.....141

§ 4.4 粉尘的爆炸特性.....143

§ 4.4.1 爆炸极限.....143

§ 4.4.2 最小发火能.....145

§ 4.4.3 发火温度.....145

§ 4.4.4 爆炸压力与压力上升速度.....146

§ 4.5 粉尘爆炸危险性的评价.....149

§ 4.5.1 概述.....149

§ 4.5.2 粉尘爆炸可能性的评价.....149

§ 4.5.3 粉尘爆炸感度的评价.....152

§ 4.5.4 爆炸威力的评价.....154

§ 4.5.5 粉尘处理工程的危险性评价.....154

§ 4.6 粉尘火灾.....165

§ 4.6.1 发火条件.....157

§ 4.6.2 粉尘火灾监测.....157

## 第五章 爆炸性物质的燃烧与爆炸..... 159

§ 5.1 爆炸品事故灾害情况..... 159

§ 5.2 爆炸性物质的种类..... 163

§ 5.3 炸药的有关知识..... 165

§ 5.3.1 炸药的分类..... 165

§ 5.3.2 炸药化学变化的基本形式..... 166

§ 5.3.3 炸药的热分解转爆炸..... 172

§ 5.3.4 炸药的燃烧转爆轰..... 174

§ 5.3.5 炸药的感度..... 180

§ 5.3.6 炸药的爆炸作用..... 197

§ 5.3.7 炸药的殉爆..... 200

§ 5.4 爆轰理论..... 203

§ 5.4.1 冲击波理论基础..... 204

§ 5.4.2 爆轰的流体动力学理论..... 210

§ 5.4.3 凝聚炸药的爆轰过程..... 215

## 第六章 自燃物的热自燃与热爆炸..... 219

§ 6.1 概述..... 219

§ 6.2 热爆炸的稳定状态理论..... 221

§ 6.2.1 均温系统热爆炸稳定理论..... 221

§ 6.2.2 非均温系统热爆炸稳定理论..... 232

§ 6.3 热爆炸的非稳定状态理论..... 252

§ 6.3.1 均温系统热爆炸非稳定理论..... 252

§ 6.3.2 非均温系统热爆炸非稳定理论..... 266

## 第七章 其它类型的燃烧与爆炸..... 269

§ 7.1 氧化性物质..... 269

§ 7.1.1 氧化性物质的种类..... 269

§ 7.1.2 氧化性物质的特性..... 273

§ 7.2 遇水燃烧物质	275
§ 7.2.1 分类	276
§ 7.2.2 特性	276
§ 7.3 混合危险性物质	277
§ 7.4 反应失控的危险性	280
§ 7.4.1 反应失控的概念	280
§ 7.4.2 反应失控的种类	281
§ 7.4.3 反应失控的原因	281
<b>第八章 火灾与爆炸的安全防范</b>	<b>286</b>
§ 8.1 灭火技术	286
§ 8.1.1 灭火的基本原理	286
§ 8.1.2 灭火剂类型及其作用原理	287
§ 8.1.3 常用灭火器材的结构与使用方法	297
§ 8.1.4 自动灭火装置	303
§ 8.1.5 阻火装置	310
§ 8.2 防爆技术	321
§ 8.2.1 爆炸泄放装置	321
§ 8.2.2 爆炸抑制系统	331
§ 8.3 建筑防火防爆措施	336
§ 8.3.1 生产过程和场所按火灾爆炸危险性分类	336
§ 8.3.2 生产厂房的耐火等级	339
§ 8.3.3 生产厂房的防火间距及安全距离	343
§ 8.3.4 建筑结构防火防爆措施	350
§ 8.4 危险物品的贮存安全	360
§ 8.5 火灾和爆炸监测	368
§ 8.5.1 火灾监测仪表	373
§ 8.5.2 爆炸监测仪表	373



# 第一章 燃烧与爆炸概论

## §1.1 燃烧和爆炸现象

燃烧是在自然界中经常发生的一种化学变化过程。广义地讲，燃烧现象是可燃物质与氧发生激烈氧化反应，反应伴随着发光效应和放热效应。

燃烧现象按其发生瞬间的特点，分为着火、自燃、闪燃三种类型。

着火：可燃物质受到外界火源的直接作用而开始的持续燃烧现象叫着火。着火是日常生活中最常见的燃烧现象，例如，用火柴点燃柴草，就会引起着火。

自燃：可燃物质虽没有受到外界火源的直接作用，但当受热达到一定温度，或由于物质内部的物理（辐射、吸附）、化学（分解、化合等）或生物（细菌、腐败作用等）反应过程所提供的热量聚积起来使其达到一定的温度，从而发生自行燃烧的现象叫“自燃”。例如，黄磷暴露于空气中时，即使在室温下，它与氧发生氧化反应放出的热量累积起来也足以使其达到自行燃烧的温度，故黄磷在空气中很容易发生自燃。

闪燃：这是液体可燃物的特征之一。当火焰或炽热物体接近一定温度下的易燃和可燃液体时，其液面上的蒸气与空气的混合物会发生一闪即灭的燃烧，这种燃烧现象叫闪燃。

此外，对于火炸药或爆炸性气体混合物的燃烧，由于其燃速很快，亦称之为“爆燃”。

爆炸是在自然界中经常发生的一种物理变化过程。广义地讲，爆炸是物质的非常急剧的物理、化学变化，在变化过程中，伴有物质所含能量的快速转变，变成物质本身或变化产物或周围介质的压缩能或运动能。爆炸的一个显著特征是爆炸点周围介质发生剧烈的压力突跃，并且由于介质受振动而发生一定的音响效应。

爆炸现象通常可分为物理爆炸、化学爆炸和核爆炸。

物理爆炸：由物质发生剧烈的物理变化所引起的爆炸现象称为物理爆炸。最常见的暖水瓶爆炸和蒸汽锅炉的爆炸、闪电、地震等都属于此类。

化学爆炸：由物质化学结构发生剧烈变化而引起的爆炸现象称为化学爆炸。化学爆炸的例子很多，如矿井瓦斯爆炸、煤矿粉尘爆炸及炸药爆炸等。

核爆炸：由原子核的裂变或聚变所释放出来的能量引起的爆炸现象称为核爆炸。如原子弹爆炸。

在一般工厂中经常发生的爆炸事故多是物质的化学爆炸。本书将重点研究物质的化学爆炸，因此，后面所提到的“爆炸”如不加说明，都是指化学爆炸。

## §1.2 燃烧三要素和爆炸三要素

发生燃烧现象必须具备三个条件：要有可燃物质；要有氧或氧化剂；要有点火源。

没有可燃物质，燃烧就失去了基础；没有氧或氧化剂，就构不成燃烧反应；但是有了可燃物质和氧或氧化剂，若没有点火源把物质加热到燃点以上，燃烧反应就不能开始。所以这三个条件是燃烧现象必备的三要素，三者缺一不可，且

此三者必须同时存在，互相接触，相互作用，才可以燃烧。一切防火和灭火措施，都是根据物质的特性及其所处的具体条件，防止其燃烧三要素同时存在、互相结合、互相作用。例如，降低工房空气中可燃气体或粉尘浓度，就是控制可燃物；把黄磷保存于水中，一氧化碳要用水封贮存等，就是为了隔绝空气；有火灾爆炸危险的工房严禁烟火就是为了消除点火源。

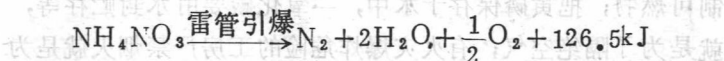
仔细观察炸药包用雷管引爆而爆炸的过程，我们可以看到瞬时产生一团火光，随即烟雾弥漫，然后听到一声巨响，爆炸点附近形成爆炸风（冲击波），建筑物或受到损坏，或受到强烈震动，这是观察到的现象。一团火光表明爆炸过程是放热的，因而形成高温而发光；爆炸瞬间完成，表明爆炸过程的速度极快；烟雾表明炸药爆炸过程中有大量气体产生，而气体迅速膨胀则是产生声响、冲击波和建筑物受到破坏或发生震动的根本原因。

综上所述，化学爆炸过程有如下三个基本特征：极快的变化速度；变化过程的放热性；形成气体产物。

**反应的快速性：**  
反应的快速性是爆炸反应区别于燃烧反应的最重要的标志。例如每千克煤燃烧可放热 $9200\text{kJ}$ ，而每千克硝化甘油的爆热为 $6300\text{kJ}$ ，但前者反应所需的时间为数分钟，而后者则可以在几微秒的时间内完成。虽然这两个反应都会放出大量热量，生成大量气体，但前者由于反应速度慢，气体产物可以扩散开而不致形成高压，故不能形成爆炸。

**反应的放热性：**  
反应的放热性是发生爆炸反应的又一必要条件，如果反应不具有放热性，则前一层物质爆炸后，不能激发下一层物

质的爆炸，这样反应便不能自动地传播下去。另外，放热也是作功的重要能源，不放热或放热很少的反应不能提供作功的能量，因此不能具有爆炸性质。例如：



同是硝酸铵的分解，但前者不具有爆炸性，后者才有爆炸性。

生成气体产物：

爆炸对周围介质作功是通过高温高压的气体迅速膨胀来实现的，因此，在反应过程中，生成大量气体也是发生爆炸的一个重要因素。例如铝热反应：



此反应的热效应很强，足以使产物加热到 $3000^\circ\text{C}$ 的高温，而且反应也相当快，但由于不形成气体产物，没有作功的介质也就不可能自身将热量转变为功，因此也就不具有爆炸性。

综上所述，快速性、放热性和生成气体产物是决定化学爆炸过程的必要三因素。放热给爆炸变化提供了能源，快速性则是有限的能源集中在小容积内以产生大功率的必要条件，反应生成的气体则是能量转换的工作介质，它们都与爆炸物的作功能力有密切的关系。

## §1.3 燃烧和爆炸的种类

### §1.3.1 燃烧

燃烧按可燃物质的物态不同可分为气体燃烧、液体燃烧

和固体燃烧三种。

可燃气体、液体或固体在空气中燃烧时，其燃烧形式一般有四种，即扩散燃烧、蒸发燃烧、分解燃烧、表面燃烧。

**扩散燃烧：**如氢、乙炔等可燃气体从管口等处流向空气时的燃烧，就是由于可燃气体分子和空气分子互相扩散、混合、当浓度达到可燃极限范围时，形成的火焰使燃烧继续下去的现象。

**蒸发燃烧：**如酒精、乙醚等易燃液体的燃烧，就是由于液体蒸发产生的蒸气被点燃起火后，形成的火焰温度进一步加热液体表面，从而促进它的蒸发，使燃烧继续下去的现象。

**分解燃烧：**很多固体或不挥发性液体，它们的燃烧是由于热分解产生可燃气体来实现。如木材和煤大多是由于分解产生可燃气体再行燃烧的。

**表面燃烧：**当可燃固体（如木材）燃烧到最后，分解不出可燃气体时，就会剩下炭和灰，此时没有可见火焰，燃烧转为表面燃烧。金属的燃烧也是一种表面燃烧，无气化过程，燃烧温度较高。

此外，根据燃烧反应的进行程度（燃烧产物）还可分为完全燃烧与不完全燃烧。

从安全角度来讲，燃烧所带来的就是火灾。火灾无论在城市、乡村，还是工厂，都是给人民生命、财产带来重大损失的主要灾害之一。据统计，在日本每一千个工厂中，每年发生的具有一定规模的火灾数为：化学工业10.4次，制材、木制品工业3.1次，铸造、冶炼企业2.8次，食品工业2.2次，机械、工具工业1.8次，纺织工业1.4次，印刷工业1.0次。从中可以看出，发生火灾事故的企业是很广泛的，其中

化学工业发生火灾次数最多。

火灾，如果按可燃物及助燃物的种类分类，则有如下六类，这六个种类各有其不同的灭火方法。

气体火灾：它是从管道或其它设备中泄露出来的可燃气体，如煤气、氢气、乙炔气、液化石油气等，被火源点燃而发生的火灾。如果火焰小，可用干粉灭火剂等喷射方法把火扑灭。但是，灭火后，未经燃烧的可燃气体可能仍然向室内泄放出来，在很多情况下，这些气体和空气形成混合物，因空气中有大量氧，有发生爆炸的危险。故对气体火灾的灭火来说，最好的方法是一面立即关闭管道的阀门，防止气体继续泄漏，一面向附近的可燃物射水，使其冷却并使气体逸散开，防止火灾扩大。

油品火灾：如原油、煤油、汽油、苯、酒精等可燃液体所发生的火灾。这种火灾是由于贮罐或容器的泄漏引起的，或者在废弃的液体上发生的，但也有在贮罐内部起火的。对它的灭火可采用撒干粉、喷二氧化碳或泡沫灭火剂，对闪点在常温以上的可燃液体，可采用冷却水把它的温度降低到闪点以下的办法来进行灭火。

可燃物火灾：如建筑物、家具、木材、纸张、纤维、纺织物等固体可燃物的火灾，最好采用喷射大量水的方法进行灭火。

电器火灾：电器配线、电动机、变压器等电气设备使用的绝缘材料发生的火灾，如果在通电情况下，用水或泡沫灭火剂进行灭火，则有可能发生触电事故，因此要采用干粉、二氧化碳或氯溴甲烷等灭火剂进行灭火。最好不使用四氯化碳灭火剂，因为四氯化碳气体本身有毒，在灭火时，如果遇到高温金属，则会产生光气，就有导致救火者中毒的危险。

**金属火灾：**镁、铝、钛、锆、铀等金属粉末或细金属丝，在空气中具有易燃性质。铁或不锈钢的管道和阀门，当其中有可燃物质时，若高速通过高压氧气或氯气，则有可能发生着火，使金属管道和阀门在氧气或氯气中燃烧，致使内部气体喷出，如果在金属火焰上喷水，则有可能发生爆炸的危险，所以要采用干燥的砂子和蛭石等进行灭火。

另外，大量的液态钠，将来可能在高速增殖原子炉上作为载热体使用，因此，对于金属钠火灾的防火灭火措施，将成为重要的研究课题。

**空气中含氧量超过正常量时导致的火灾：**当空气中氧气浓度超过正常数值时，会急剧增加可燃物的燃烧速度，因而增大了单位时间内所产生的燃烧热量，甚至导致空气中非燃烧物质的燃烧，比如，棉布在水平方向燃烧时，如果空气中氧气浓度达30%时，其燃烧速度比正常空气中（含氧21%）快两倍。又如，在船台上进行组合船体作业时，由于是在换气量较少的作业场所中进行气割工作，在泄漏氧气的情况下，工作服被火点着，以致发生工作者全身烧伤的事情是屡见不鲜的。还有，在空气液化间的地坑内流进液态氧，产生冷氧气，而在坑内作业时产生的冲击火花，使工作者衣服着火以致使全身烧伤。又如，在高压氧气治疗室的患者，由于自备火炉取暖或有火烛，烧着了衣服或引起爆炸事故，因而致死的例子也是有的。

对于各类火灾，必须周详地考虑各种预防、限制、灭火和疏散等措施，现分述如下：

#### 预防措施：

这是在火灾发生之前，预先防止火源点燃的措施，是一种最根本的防火措施，这种措施是把有起火危险性的物质以及

具有点火能量的着火源，有效地、恰当地进行管理。除此之外，别无他法。

所谓预防火灾，就是要把危险性物质和着火源恰当地管理好，使它们无法造成起火条件。因此，对火灾的发生条件，应该具备有足够的知识，把重点首先放在发火的预防上。

#### 限制措施：

一旦发生了火灾，则必须认真果断地采取防止火焰蔓延的限制措施，在限制措施中，必须考虑以下几个问题：

防止可燃物的堆积：火灾扩大多数是在离起火点较近的地方堆积有可燃物而使火焰蔓延开来，在有火灾危险的工作场所中，如果大量堆积不必要的原料、半成品、成品等是十分危险的。如果要贮存这些东西，必须设置安全的仓库和堆场。

使建筑物、设备成为非燃烧或难燃烧体：建筑物应当采用非燃烧或难燃烧体的结构，对内面的家具、器具等设备，也应尽量采用难燃烧材料制成。另外，特别要注意，一些材料或制品虽然具有难燃性能，但在火灾时能发生大量烟和有害气体材料，也应避免使用。

设置防火墙、防火门、防油堤、防液堤等：在建筑物内要设置防燃墙，或在走廊内设置防火门等；在可燃液体罐周围设置防油堤；在液化气罐周围设置防液堤，以免贮罐泄漏时使其液体流散的很远。

留出空地：在危险物贮存场所，或者在进行危险操作的建筑物周围，要留出一定的空地，或者保持一定的距离，以免火灾危险波及到其他设施，另外，根据城建规划，有必要采取在工厂区和住宅区之间设置防护林带，避免公害影响，



以保护居民的安全。

将危险物设施埋在地下：汽油罐、液化气罐等在防火上最为安全的是一种地下罐的形式。在城市供油站中采用的汽油罐、液化气罐很多都是埋地下设置的。对于原油罐，最近也采用半地下式的大型油罐。

灭火措施：

灭火措施分为初期灭火和正规灭火两个方面。

初期灭火：所谓初期灭火，就是刚刚起火后，最初应该采取的应急措施。在初期灭火中可使用灭火器，灭火器有多种，如干粉、二氧化碳、挥发性液体（如氯溴甲烷）、泡沫、酸碱等灭火器。随着灭火剂性质或结构的不同，适应的火灾场所也不同，对于可燃物质，应选择最为适合的灭火器。几种常用小型灭火器的主要性能、用途和使用方法见表1-1。在初期灭火（刚起火）中，使用砂土、水等是最为有效的方法。作为初期灭火的设施，它可在适当的场所中设置自动洒水器、喷雾、泡沫等固定式灭火设备。此外，为及时抓住初期灭火的机会，在适当的场所中可设自动灭火报警装置。

正规灭火：所谓正规灭火，是指企业消防队或城市消防队的灭火活动，当火灾扩大到某种规模以上时，不依靠这些消防力量是不行的。

消防水源可利用城市上下水、工业上下水、河川水、湖泊和海水等，但是应该考虑有单独设置的贮水槽、蓄水池等。

在贮存或处理大量危险物质的工厂中，当火灾发生时如果用直接喷射水灭火，有的反而会带来危险，所以在用消防泵送水进行冷却的同时，有必要用化学消防泵直接进行灭