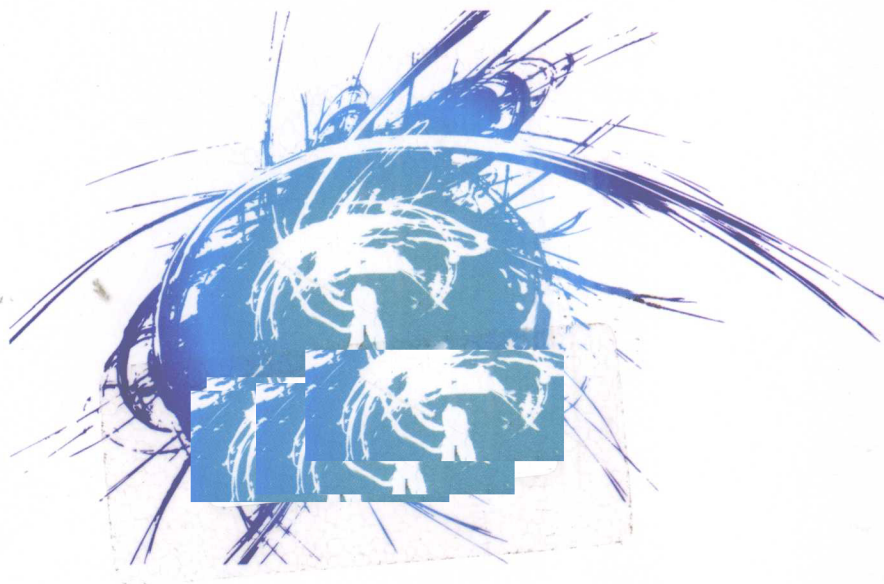


# 燃烧与爆炸学

---

张英华 黄志安 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 燃 烧 与 爆 炸 学

张英华 黄志安 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2010

## 内 容 提 要

燃烧与爆炸学是一门研究火灾及爆炸发生、发展及演化规律的科学。通过学习燃烧与爆炸学,了解燃烧与爆炸的机理与热分解过程,掌握燃烧、爆炸的基本概念和基本理论,培养相关的实验技能,如测试气体、粉尘爆炸参数的方法等,为安全工程专业课程的学习打下基础。

本书可供相关专业领域的科研人员和工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

燃烧与爆炸学/张英华,黄志安编著. —北京:冶金工业出版社,2010.5

ISBN 978-7-5024-5269-8

I. ①燃… II. ①张… ②黄… III. ①燃烧学 ②爆炸—研究 IV. ①O643.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第077524号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 尚海霞 美术编辑 张媛媛 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5269-8

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010年5月第1版,2010年5月第1次印刷

148mm×210mm;9.75印张;289千字;298页

30.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

可控的燃烧与爆炸会给生产带来高效率，给生活带来便利；但失控的燃烧与爆炸会发生火灾与爆炸事故，如各类火灾、粉尘爆炸、瓦斯爆炸等。所以，研究燃烧与爆炸理论和过程，对减少和避免生产生活中的火灾和爆炸事故有重要作用，对环境保护、安全生产、燃料的有效使用具有十分重要的意义。

本书共分6章。第1章叙述燃烧与爆炸过程的本质和发生条件，以及燃烧特征参数的计算；第2章介绍构成燃烧与爆炸物理基础的传热和传质理论；第3章以谢苗诺夫热自燃理论、弗兰克-卡门涅茨基自燃理论为例较为详细地介绍了着火的过程和条件；第4章~第6章分别介绍可燃气体、可燃液体以及可燃固体的燃烧与爆炸理论和特点。为加强读者对概念的理解，结合每章所述内容，每章末尾都设计了习题与思考题。

本书力求简明扼要，深入浅出，以介绍基本理论和基础知识为重点，对燃烧与爆炸理论基础及其发生过程做了详细的阐述，并结合编者多年的研究成果，力图对读者有所启迪。

本书由北京科技大学张英华、黄志安编著。具体分工是：第1章由张英华、丁光华编写，第2章由黄志安、董向梅编写，第3章由张英华、李立峰编写，第4章由张英华、

李丽娟编写，第5章由黄志安、胡春丽编写，第6章由黄志安、高玉坤编写。在编写过程中，参阅了一些专家的书籍和研究成果，吸收和借鉴了一些教材的精华，在此对这些专家学者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加上时间紧迫，书中难免存在不足及疏漏之处，欢迎读者批评指正。

编 者

2010年3月

## 书中主要符号表

$A$	面积	$K_m$	爆炸指数
$\mathcal{A}$	功热当量	$L$	距离
$B$	氧平衡率	$L_v$	蒸发热
$Bi$	毕渥数	$m$	质量
$c$	热容, 比热容, 声速, 真空光速	$M$	马赫数
$C_i$	浓度	$n$	物质的摩尔质量
$c_p$	比定压热容	$Nu$	努塞尔数
$C_R$	热剩焦量	$OI$	氧指数
$C_S$	减光系数	$p$	压力
$c_v$	比定容热容	$Pr$	普朗特数
$d$	饱和含湿量, 直径	$q$	传热量
$D$	直径	$q_v$	蒸发潜热
$D_0$	扩散系数	$q_x$	热流通量, 热流密度
$E$	活化能	$Q$	热量, 热效应
$f$	燃料空气比, 油气比	$Q_1$	低热值
$Fo$	傅里叶数	$Q_h$	高热值
$G$	质量流量	$Q_m$	质量热值
$G_{cr}$	临界质量流量	$Q_v$	体积热值
$G_S$	质量燃烧速度	$r$	活度系数
$h$	火焰与固体表面之间的对流 换热系数, 普朗克常数	$R$	普适气体常数, 理想气体 状态常量
$H$	焓值, 对流换热系数, 厚度	$Ra$	拉格利数
$I$	光强度, 辐射强度	$Re$	雷诺数
$k$	导热系数	$R_1$	殉爆安全距离
$K$	玻耳兹曼常数, 反应速度 常数, 吸收系数	$S$	单位固体表面上净获热 速率, 焓
$K_0$	频率因子	$t$	时间, 温度, 功热当量

---

$t_v$	扰动指数(点火延迟)	$e$	辐射率
$T$	温度	$\lambda$	分子导热系数
$T_f$	膜温度	$\mu$	放热系数
$v$	速度	$\rho$	密度
$V$	体积	$\sigma$	斯忒藩-玻耳兹曼常数
$\alpha$	热扩散系数,导温系数	$f$	固体在燃点时的燃烧热传递 到其表面的份数
$\beta$	过量燃料系数,过量空气 系数	$\Phi$	角系数
$\gamma$	比热容比	$\omega$	反应速率

# 目 录

1 燃烧与爆炸的化学基础 .....	1
1.1 燃烧与爆炸的本质和条件 .....	1
1.1.1 燃烧 .....	1
1.1.2 燃烧理论 .....	1
1.1.3 燃烧的条件 .....	5
1.1.4 爆炸及其特征 .....	6
1.1.5 爆炸理论 .....	7
1.1.6 爆炸的分类 .....	8
1.1.7 爆炸发生的条件 .....	12
1.2 燃烧反应速度理论 .....	14
1.2.1 反应速率的基本概念 .....	15
1.2.2 质量作用定律 .....	15
1.2.3 阿累尼乌斯定律 .....	16
1.2.4 燃烧反应速度方程 .....	17
1.3 燃烧空气量的计算 .....	20
1.3.1 理论空气量 .....	20
1.3.2 实际空气量和过量空气系数 .....	23
1.3.3 燃料空气比与过量燃料系数 .....	25
1.4 燃烧产物及其计算 .....	26
1.4.1 燃烧产物的组成及其毒害作用 .....	26
1.4.2 完全燃烧时产物量的计算 .....	31
1.4.3 不完全燃烧时烟气量的计算 .....	34
1.5 燃烧热的计算 .....	36
1.5.1 热容 .....	36
1.5.2 燃烧热 .....	39
1.6 燃烧温度的计算 .....	44



1.6.1	燃烧温度的分类	44
1.6.2	燃烧温度的计算	45
	习题与思考题	48
<b>2</b>	<b>燃烧与爆炸的物理基础</b>	<b>49</b>
2.1	热传导	49
2.1.1	傅里叶导热定律	50
2.1.2	导热微分方程	50
2.1.3	非稳态导热	52
2.2	热对流	55
2.2.1	边界层	55
2.2.2	牛顿公式和对流换热系数	56
2.2.3	对流换热过程的边界层分析求解	57
2.3	热辐射	63
2.3.1	基本概念和基本定律	64
2.3.2	热气体和非发光火焰的辐射	66
2.3.3	发光火焰和热烟气辐射	69
2.4	物质的传递	71
2.4.1	物质的扩散	71
2.4.2	斯蒂芬流	73
2.4.3	燃烧引起的浮力运动	76
	习题与思考题	78
<b>3</b>	<b>着火理论</b>	<b>79</b>
3.1	着火分类和着火条件	79
3.1.1	着火的分类	79
3.1.2	着火条件	79
3.2	谢苗诺夫热自燃理论	81
3.2.1	谢苗诺夫热自燃理论概述	81
3.2.2	着火温度和容器壁温度的关系	84
3.2.3	着火时混合气压力与其他参数的关系	85

3.3 弗兰克-卡门涅茨基自燃理论 .....	88
3.3.1 弗兰克-卡门涅茨基热自燃理论 .....	89
3.3.2 自燃临界准则参数 $\delta_{cr}$ 的求解 .....	91
3.3.3 理论应用 .....	93
3.4 链式反应 .....	94
3.4.1 热爆燃理论及其局限性 .....	94
3.4.2 链式反应的概念 .....	95
3.4.3 直链反应 .....	96
3.4.4 分支链反应 .....	97
3.4.5 链式自燃着火条件 (链式分支反应的发展条件) ..	97
3.4.6 着火半岛现象 .....	102
3.4.7 烃类氧化的链反应 .....	105
3.5 强迫着火 .....	110
3.5.1 强迫着火的特点 .....	110
3.5.2 常用点火方法 .....	111
3.5.3 引燃最小能量 .....	114
3.5.4 电极熄火距离 .....	115
3.5.5 静止混合气中电火花引燃最小能量的半经验公式 ..	117
习题与思考题 .....	119
<b>4 可燃气体的燃烧与爆炸 .....</b>	<b>121</b>
4.1 层流预混火焰传播机理 .....	121
4.2 层流预混火焰传播速度 .....	126
4.2.1 火焰传播速度的定义 .....	126
4.2.2 火焰焰锋结构 .....	126
4.2.3 层流火焰传播速度——马兰特简化分析 .....	129
4.2.4 影响火焰传播速度的因素 .....	131
4.3 可燃气体爆炸 .....	137
4.3.1 预混合气爆炸温度计算 .....	137
4.3.2 可燃性混合气爆炸压力的计算 .....	139
4.3.3 爆炸时的升压速度 .....	140

4.3.4	爆炸威力指数 .....	141
4.3.5	爆炸总能量 .....	142
4.3.6	爆炸参数测定 .....	142
4.4	爆炸极限理论及计算 .....	144
4.4.1	爆炸极限理论 .....	144
4.4.2	爆炸极限的影响因素 .....	147
4.4.3	可燃混合气爆炸极限计算 .....	151
4.5	爆轰 .....	155
4.5.1	激波的形成 .....	155
4.5.2	激波的性质 .....	160
4.5.3	在空间运动的激波 .....	164
4.5.4	爆轰的发生 .....	166
4.5.5	爆轰形成条件 .....	167
4.5.6	爆轰波波速和压力 .....	168
4.6	气体爆炸的预防 .....	169
4.6.1	严格控制火源 .....	169
4.6.2	防止预混可燃气产生 .....	173
4.6.3	用惰性气体预防气体爆炸 .....	174
4.6.4	用阻火装置防止爆炸传播 .....	174
4.7	湍流燃烧和扩散燃烧 .....	178
4.7.1	湍流燃烧 .....	178
4.7.2	扩散燃烧 .....	186
	习题与思考题 .....	195
5	可燃液体的燃烧与爆炸 .....	197
5.1	液体燃料的燃烧特点 .....	197
5.2	液体的蒸发 .....	198
5.2.1	蒸发过程 .....	198
5.2.2	蒸气压 .....	198
5.2.3	蒸发热 .....	201
5.2.4	液体的沸点 .....	201

5.3 闪燃与爆炸温度极限 .....	202
5.3.1 闪燃与闪点 .....	202
5.3.2 同类液体闪点变化规律 .....	203
5.3.3 混合液体闪点 .....	204
5.3.4 闪点计算 .....	205
5.3.5 爆炸温度极限 .....	209
5.4 液态可燃物的火灾蔓延 .....	214
5.4.1 油池火 .....	214
5.4.2 液面火 .....	217
5.4.3 含油的固面火 .....	220
5.4.4 液雾中的火蔓延 .....	223
5.5 油罐火灾燃烧 .....	226
5.5.1 液体的稳定燃烧 .....	226
5.5.2 原油和重质石油产品燃烧时的沸溢和喷溅 .....	237
习题与思考题 .....	241
<b>6 可燃固体的燃烧与爆炸 .....</b>	<b>243</b>
6.1 固体燃烧概述 .....	243
6.1.1 固体燃烧的形式 .....	243
6.1.2 评价固体可燃性的参数 .....	244
6.2 固体着火燃烧理论 .....	245
6.2.1 固体引燃条件和引燃时间 .....	245
6.2.2 固体火焰传播理论 .....	249
6.2.3 固体着火和燃烧的影响因素 .....	250
6.3 煤燃烧 .....	256
6.3.1 煤的成分及分类 .....	256
6.3.2 煤的燃烧过程 .....	258
6.3.3 煤燃烧过程的影响因素 .....	260
6.4 固体阴燃 .....	261
6.4.1 阴燃的发生条件 .....	261
6.4.2 阴燃的传播理论 .....	261

---

6.4.3 阴燃的影响因素 .....	264
6.4.4 阴燃向有焰燃烧的转变 .....	267
6.5 粉尘爆炸 .....	268
6.5.1 粉尘爆炸的条件 .....	268
6.5.2 粉尘爆炸的过程和特点 .....	269
6.5.3 粉尘爆炸的重要特性参数 .....	271
6.5.4 粉尘爆炸的影响因素 .....	272
6.5.5 粉尘爆炸的预防和控制 .....	280
6.6 炸药爆炸 .....	285
6.6.1 炸药的爆炸特点及其分类 .....	285
6.6.2 炸药的爆炸性能 .....	286
6.6.3 炸药的爆炸及其破坏机理 .....	290
6.6.4 炸药的殉爆 .....	291
6.6.5 炸药的安全与安全炸药 .....	293
习题与思考题 .....	296
参考文献 .....	298

# 1 燃烧与爆炸的化学基础

## 1.1 燃烧与爆炸的本质和条件

### 1.1.1 燃烧

燃烧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，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，产物中会混有一些微小颗粒，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。在氧化还原反应中，失去电子的物质被氧化，获得电子的物质被还原。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，但所发生的是一个剧烈的氧化还原反应，并伴随着光和热的发生。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2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 燃烧理论

#### 1.1.2.1 活化能理论

物质分子间发生化学反应，首要的条件是相互碰撞。然而，为了使可燃物和助燃物两种气体分子间产生氧化反应，仅仅依靠两种分子发生碰撞是不够的，在互相碰撞的分子间会产生一般的排斥力。在通

常的条件下，这些分子没有足够的能量来发生氧化反应，只有当一定数量的分子获得足够的能量后，才能在碰撞时引起分子的组成部分产生显著的振动，使分子中的原子或原子群之间的结合减弱，分子各部分的重排才有可能。有可能引起化学反应的分子，称为活化分子。活化分子所具有的能量要比普通分子高，这一能量超出值可使分子活化并参加反应。使普通分子变为活化分子所必需的能量称为活化能。活化能示意图如图 1-1 所示。

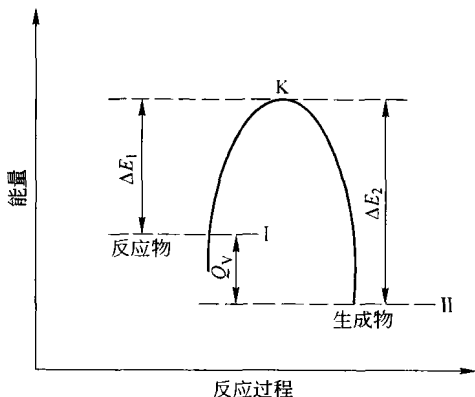


图 1-1 活化能示意图

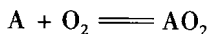
图 1-1 中的纵坐标表示所研究系统的分子能量，横坐标表示反应过程。若系统状态 I 转变为状态 II，由于状态 I 的能量大于状态 II 的能量，所以该过程是放热的，反应热效应等于  $Q_v$ 。 $Q_v$  即等于状态 I 与状态 II 的能级差。状态 K 的大小相当于使反应发生所必需的能量，所以，状态 K 的能级与状态 I 的能级之差等于正向反应的活化能  $\Delta E_1$ ，状态 K 与状态 II 的能级之差等于逆向反应的活化能  $\Delta E_2$ ， $\Delta E_2$  与  $\Delta E_1$  之差 ( $\Delta E_2 - \Delta E_1$ ) 等于反应热效应。

活化能理论指出了可燃物和助燃物两种气体分子发生氧化反应的可能性及其条件。

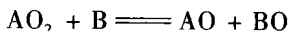
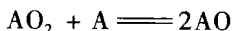
### 1.1.2.2 过氧化物理论

过氧化物理论认为，分子在各种能量（热能、辐射能、电能、

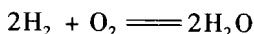
化学反应能)的作用下可以被活化。比如在燃烧反应中,首先是氧分子( $O=O$ )在热能作用下活化,被活化的氧分子的双键之一断开,形成过氧基 $-O-O-$ ,这种基能加合于被氧化物的分子上而形成过氧化物:



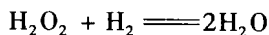
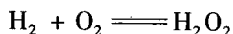
在过氧化物的成分中有过氧基( $-O-O-$ ),这种基中的氧原子较游离分子中的氧原子更不稳定。因此,过氧化物是强烈的氧化剂,不仅能氧化形成过氧化物的物质A,而且也能氧化用分子氧很难氧化的其他物质B:



例如,氢与氧的燃烧反应,通常直接表达式为:



按照过氧化物理论,认为先是氢和氧生成过氧化氢,然后才是过氧化氢再与氢反应生成 $H_2O$ 。其反应式为:



有机过氧化物通常可看做过氧化氢 $H-O-O-H$ 的衍生物,其中,有1个或2个氢原子被烃基取代而成为 $H-O-O-R$ 或 $R-O-O-R$ 。所以,过氧化物是可燃物质被氧化时的最初产物,它们是不稳定的化合物,能够在受热、撞击、摩擦等情况下分解产生自由基和原子,从而又促使新的可燃物质氧化。

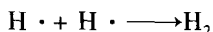
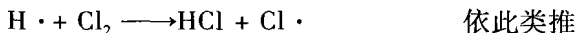
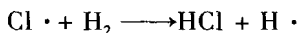
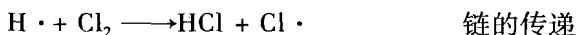
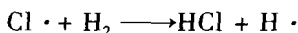
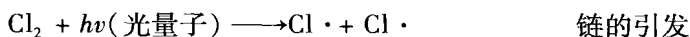
过氧化物理论在一定程度上解释了为何物质在气态下有被氧化的可能性。它假定氧分子只进行单键的破坏,这比双键的破坏要容易一些。因为破坏1mol氧的单键只需要29.3~33kJ的能量。但是若考虑到C-H键也必须破坏,氧分子也必须加合于碳氢化合物之上而形成过氧化物,所以氧化过程还是很困难的。因此,巴赫又提出了另一种说法,即易氧化的可燃物质具有足以破坏氧中单键所需的“自由能”,所以不是可燃物质本身而是它的自由基被氧化。这种观点就是



近代关于氧化作用的链式反应理论的基础。

### 1.1.2.3 链式反应理论

根据上述原理，一个活化分子（基）只能与一个分子起反应。但为什么在氯化氢的反应中，引入一个光子能生成十万个氯化氢分子，这就是链式反应的结果。根据链式反应理论，气态分子间的作用，不是两个分子直接作用得到最后产物，而是活化分子自由基与另一个分子起作用。作用结果产生新基，新基又迅速参与反应，如此延续下去而形成一系列的链式反应。氯与氢的反应就是这样：



上列反应式表明，最初的游离基（或称活性中心、作用中心等）是在某种能源的作用下生成的，产生游离基的能源可以是受热分解或光照、氧化、还原、催化和射线照射等。游离基由于具有比普通分子平均动能更多的活化能，所以其活动能力非常强，在一般条件下是不稳定的，容易与其他物质分子进行反应而生成新的游离基，或者自行结合成稳定的分子。因此，利用某种能源设法使反应物产生少量的活性中心——游离基时，这些最初的游离基即可引起链式反应，因而使燃烧得以持续进行，直至反应物全部反应完毕。在链式反应中，如果作用中心消失，就会使链式反应中断，而使反应减弱直至燃烧停止。

总的来说，链式反应机理大致可分为3段：（1）链引发，即游离基生成，使链式反应开始；（2）链传递，游离基作用于其他参与反应的化合物，产生新的游离基；（3）链终止，即游离基消耗完使链式反应终止。造成游离基消耗的原因是多方面的，如游离基相互碰撞生成分子、与掺入混合物中的杂质起副反应、与非活化的同类分子