



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12.5" GUIHUA JIAOCAI

燃烧与爆炸学

(第2版)

张英华 黄志安 高玉坤 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

燃烧与爆炸学

(第2版)

张英华 黄志安 高玉坤 主编

北京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

燃烧与爆炸学是一门研究火灾及爆炸发生、发展和熄灭基本规律的科学。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、爆炸的基本理论与原理,以及实验、试验、测试气体、粉尘爆炸参数的方法,为防火与防爆安全专业课程的学习打下基础。全书分为六章,第1章介绍了燃烧与爆炸的化学基础,包括燃烧与爆破的本质及条件,关于燃烧爆炸的一些计算方法;第2章介绍了热传导、对流换热、热辐射及物质的传递;第3章介绍了着火分类和着火条件、谢苗诺夫热自燃理论、弗兰克-卡门涅茨基热自燃理论、链反应、强迫着火;第4章~第6章分别介绍了可燃气体、可燃液体和可燃固体的燃烧与爆炸。

本书可作为高等院校安全工程、机械工程、化学工程、环境工程等相关专业的教材,也可以作为相关专业研究生的教学参考书;对从事安全、矿业和化工工程的技术人员,也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧与爆炸学/张英华等主编. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2015. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7017-3

I. ①燃… II. ①张… III. ①燃烧学—高等学校—教材
②爆炸—理论—高等学校—教材 IV. ①O643. 2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第191391号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 王雪涛 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7017-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2010年5月第1版,2015年8月第2版,2015年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.75印张; 352千字; 221页

32.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

第2版前言

《燃烧与爆炸学》一书于2010年出版以来，受到了安全工程领域的关注，被多所大专院校选作安全科学与工程专业的本科生的专业课教材和研究生入学考试的参考书。随着燃烧与爆炸学科及相关技术领域的不断发展，涌现出的新科研成果，使火灾和爆炸发生、发展及演化规律的研究逐渐丰富和完善。基于这一客观实际，参考第1版读者的修改意见和建议，我们在第1版书稿的基础上，对内容进行修订，以适时体现科学技术的发展，满足安全工程及相关技术领域院校教学、科学研究和生产实践的需要。

张英华、黄志安、高玉坤任本书主编，负责全书的统一整理和修改。具体分工：第1章由张英华、罗强、杨飞修订，第2章由黄志安、姬宇晨修订，第3章由张英华、刘佳修订，第4章由高玉坤、宫雪皎修订，第5章由黄志安、宋守一修订，第6章由高玉坤、刘芳喆修订。王辉、陈立、赵乾、白智明、周佩玲、付明明、姬玉成等参与了修订工作。由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳切希望读者批评指正。

《燃烧与爆炸学》这次修订出版工作得到了教育部“十二五”期间高等学校本科教学质量与教学改革工程建设项目和北京科技大学教材建设经费资助，学校在编写工作和出版经费方面给予了大力支持和帮助；修订工作还得到了北京科技大学土木与环境工程学院相关领导和老师们的支持和帮助，在此一并致以诚挚的谢意。

编者
2015年6月

第1版前言

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-卡门涅茨基热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 | Nu | 努塞尔数 |
| \mathcal{A} | 功热当量 | OI | 氧指数 |
| B | 氧平衡率 | p | 压力 |
| Bi | 毕渥数 | Pr | 普朗特数 |
| c | 热容, 比热容, 声速, 真空光速 | q | 传热量 |
| C_i | 浓度 | q_v | 蒸发潜热 |
| c_p | 比定压热容 | q_x | 热流通量, 热流密度 |
| c_v | 比定容热容 | Q | 热量, 热效应 |
| C_R | 热剩焦量 | Q_l | 低热值 |
| C_s | 减光系数 | Q_h | 高热值 |
| d | 饱和含湿量, 直径 | Q_m | 质量热值 |
| D | 直径 | Q_v | 体积热值 |
| D_0 | 扩散系数 | r | 活度系数 |
| E | 活化能 | R | 普适气体常数, 理想气体状态常量 |
| f | 燃料空气比, 油气比, 固体在燃点时的 燃烧热传递到其表面的份数 | Ra | 拉格利数 |
| Fo | 傅里叶数 | Re | 雷诺数 |
| G | 质量流量 | R_i | 殉爆安全距离 |
| G_{cr} | 临界质量流量 | S | 单位固体表面上净获热速率, 熵 |
| G_s | 质量燃烧速度 | t | 时间, 温度, 功热当量 |
| h | 火焰与固体表面之间的对流换热系数, 普朗克常数 | t_v | 扰动指数(点火延迟) |
| H | 焓值, 对流换热系数, 厚度 | T | 温度 |
| I | 光强度, 辐射强度 | T_f | 膜温度 |
| k | 导热系数 | v | 速度 |
| K | 玻耳兹曼常数, 反应速度常数, 吸收系数 | V | 体积 |
| K_0 | 频率因子 | α | 热扩散系数, 导温系数 |
| K_m | 爆炸指数 | β | 过量燃料系数, 过量空气系数 |
| L | 距离 | γ | 比热容比 |
| L_v | 蒸发热 | e | 辐射率 |
| m | 质量 | λ | 分子导热系数 |
| Ma | 马赫数 | μ | 放热系数 |
| n | 物质的摩尔质量 | ρ | 密度 |
| | | σ | 斯忒藩-玻耳兹曼常数 |
| | | Φ | 角系数 |
| | | ω | 反应速率 |

冶金工业出版社部分图书推荐

| 书 名 | 作 者 | 定价(元) |
|-----------------------|---------|--------|
| 中国冶金百科全书·安全环保卷 | 本书编委会 编 | 120.00 |
| 我国金属矿山安全与环境科技发展前瞻研究 | 古德生 等著 | 45.00 |
| 安全学原理(本科教材) | 金龙哲 主编 | 27.00 |
| 安全系统工程(本科教材) | 谢振华 主编 | 26.00 |
| 安全评价(本科教材) | 刘双跃 主编 | 36.00 |
| 事故调查与分析技术(本科教材) | 刘双跃 主编 | 34.00 |
| 物理污染控制工程(本科教材) | 杜翠凤 等编 | 30.00 |
| 工业通风与除尘(本科教材) | 蒋仲安 等编 | 30.00 |
| 矿井通风与除尘(本科教材) | 浑宝炬 等编 | 25.00 |
| 产品安全与风险评估(本科教材) | 黄国忠 编著 | 18.00 |
| 防火与防爆工程(本科教材) | 解立峰 等编 | 45.00 |
| 矿山安全工程(本科教材) | 陈宝智 主编 | 30.00 |
| 矿山环境工程(第2版)(本科教材) | 蒋仲安 主编 | 39.00 |
| 化工安全(本科教材) | 邵 辉 主编 | 35.00 |
| 土木工程安全生产与事故安全分析(本科教材) | 李慧民 等编 | 30.00 |
| 土木工程安全检测与鉴定(本科教材) | 李慧民 等编 | 31.00 |
| 土木工程安全管理教程(本科教材) | 李慧民 等编 | 33.00 |
| 安全系统工程(高职高专教材) | 林 友 等编 | 24.00 |
| 安全生产与环境保护(高职高专教材) | 张丽颖 主编 | 24.00 |
| 金属矿山环境保护与安全(高职高专教材) | 孙文武 主编 | 35.00 |
| 煤矿钻探工艺与安全(高职高专教材) | 姚向荣 等编著 | 43.00 |
| 矿冶企业生产事故安全预警技术研究 | 李翠平 等著 | 35.00 |
| 非煤矿山安全知识15讲 | 吴 超 等编 | 20.00 |
| 安全管理基本理论与技术 | 常占利 著 | 46.00 |
| 爆破安全技术 | 王玉杰 编 | 25.00 |
| 安全管理技术 | 袁昌明 编著 | 46.00 |
| 钢铁企业安全生产管理 | 那宝魁 编著 | 46.00 |
| 玩具质量管理与安全 | 李家庆 主编 | 45.00 |
| 综采工作面人-机-环境系统安全性分析 | 王玉林 等著 | 32.00 |
| 职业健康与安全工程 | 张顺堂 等编 | 36.00 |

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 | 3 |
| 1.1.4 爆炸及其特征 | 4 |
| 1.1.5 爆炸理论 | 5 |
| 1.1.6 爆炸的分类 | 6 |
| 1.1.7 爆炸发生的条件 | 8 |
| 1.2 燃烧反应速度理论 | 10 |
| 1.2.1 反应速率的基本概念 | 10 |
| 1.2.2 质量作用定律 | 10 |
| 1.2.3 阿累尼乌斯定律 | 11 |
| 1.2.4 燃烧反应速度方程 | 12 |
| 1.3 燃烧空气量的计算 | 13 |
| 1.3.1 理论空气量 | 13 |
| 1.3.2 实际空气量和过量空气系数 | 16 |
| 1.3.3 燃料空气比与过量燃料系数 | 17 |
| 1.4 燃烧产物及其计算 | 18 |
| 1.4.1 燃烧产物的组成及其毒害作用 | 18 |
| 1.4.2 完全燃烧时产物量的计算 | 21 |
| 1.4.3 不完全燃烧时烟气量的计算 | 24 |
| 1.5 燃烧热的计算 | 25 |
| 1.5.1 热容 | 25 |
| 1.5.2 燃烧热 | 28 |
| 1.6 燃烧温度的计算 | 31 |
| 1.6.1 燃烧温度的分类 | 31 |
| 1.6.2 燃烧温度的计算 | 32 |
| 习题与思考题 | 34 |
| 2 燃烧与爆炸的物理基础 | 35 |
| 2.1 热传导 | 35 |

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 2.1.1 | 傅里叶导热定律 | 35 |
| 2.1.2 | 导热微分方程及其推导 | 36 |
| 2.1.3 | 非稳态导热 | 39 |
| 2.2 | 热对流 | 42 |
| 2.2.1 | 边界层 | 42 |
| 2.2.2 | 牛顿公式和对流换热系数 | 42 |
| 2.2.3 | 对流换热过程的边界层分析求解 | 43 |
| 2.3 | 热辐射 | 47 |
| 2.3.1 | 基本概念和基本定律 | 47 |
| 2.3.2 | 热气体和非发光火焰的辐射 | 49 |
| 2.3.3 | 发光火焰和热烟气辐射 | 51 |
| 2.4 | 物质的传递 | 52 |
| 2.4.1 | 物质的扩散 | 53 |
| 2.4.2 | 斯蒂芬流 | 54 |
| 2.4.3 | 燃烧引起的浮力运动 | 56 |
| 2.5 | 蜡烛的燃烧现象和燃烧机理 | 57 |
| 2.5.1 | 蜡烛燃烧过程中的传热问题 | 57 |
| 2.5.2 | 蜡烛燃烧过程中的传质问题 | 57 |
| | 习题与思考题 | 59 |
| 3 | 着火理论 | 60 |
| 3.1 | 着火分类和着火条件 | 60 |
| 3.1.1 | 着火的分类 | 60 |
| 3.1.2 | 着火条件 | 60 |
| 3.2 | 谢苗诺夫热自燃理论 | 61 |
| 3.2.1 | 谢苗诺夫热自燃理论概述 | 61 |
| 3.2.2 | 着火温度和容器壁温度的关系 | 63 |
| 3.2.3 | 着火时混合气压力与其他参数的关系 | 64 |
| 3.3 | 弗兰克-卡门涅茨基热自燃理论 | 66 |
| 3.3.1 | 弗兰克-卡门涅茨基热自燃理论概述 | 66 |
| 3.3.2 | 自燃临界准则参数 δ_{cr} 的求解 | 68 |
| 3.3.3 | 理论应用 | 69 |
| 3.4 | 链式反应 | 70 |
| 3.4.1 | 热爆燃理论及其局限性 | 70 |
| 3.4.2 | 链式反应的概念 | 70 |
| 3.4.3 | 直链反应 | 71 |
| 3.4.4 | 分支链反应 | 72 |
| 3.4.5 | 链式自燃着火条件 (链式分支反应的发展条件) | 72 |
| 3.4.6 | 着火半岛现象 | 75 |

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.4.7 烃类氧化的链反应 | 77 |
| 3.5 强迫着火 | 80 |
| 3.5.1 强迫着火的特点 | 80 |
| 3.5.2 常用点火方法 | 81 |
| 3.5.3 引燃最小能量 | 83 |
| 3.5.4 电极熄火距离 | 84 |
| 3.5.5 静止混合气中电火花引燃最小能量的半经验公式 | 84 |
| 3.6 白磷自燃实验 | 86 |
| 3.6.1 实验方法 | 86 |
| 3.6.2 注意事项 | 87 |
| 习题与思考题 | 87 |
| 4 可燃气体的燃烧与爆炸 | 88 |
| 4.1 层流预混火焰传播机理 | 88 |
| 4.2 层流预混火焰传播速度 | 91 |
| 4.2.1 火焰传播速度的定义 | 91 |
| 4.2.2 火焰焰锋结构 | 92 |
| 4.2.3 层流火焰传播速度——马兰特简化分析 | 93 |
| 4.2.4 影响火焰传播速度的因素 | 94 |
| 4.3 可燃气体爆炸 | 99 |
| 4.3.1 预混合气爆炸温度计算 | 99 |
| 4.3.2 可燃性混合气爆炸压力的计算 | 100 |
| 4.3.3 爆炸时的升压速度 | 101 |
| 4.3.4 爆炸威力指数 | 102 |
| 4.3.5 爆炸总能量 | 102 |
| 4.3.6 爆炸参数测定 | 102 |
| 4.4 爆炸极限理论及计算 | 104 |
| 4.4.1 爆炸极限理论 | 104 |
| 4.4.2 爆炸极限的影响因素 | 106 |
| 4.4.3 可燃混合气爆炸极限计算 | 108 |
| 4.5 爆轰 | 111 |
| 4.5.1 激波的形成 | 111 |
| 4.5.2 激波的性质 | 114 |
| 4.5.3 在空间运动的激波 | 118 |
| 4.5.4 爆轰的发生 | 118 |
| 4.5.5 爆轰形成条件 | 119 |
| 4.5.6 爆轰波波速和压力 | 120 |
| 4.6 气体爆炸的预防 | 121 |
| 4.6.1 严格控制火源 | 121 |

| | | |
|----------|--------------------------|------------|
| 4.6.2 | 防止预混可燃气产生 | 124 |
| 4.6.3 | 用惰性气体预防气体爆炸 | 124 |
| 4.6.4 | 用阻火装置防止爆炸传播 | 125 |
| 4.7 | 湍流燃烧和扩散燃烧 | 127 |
| 4.7.1 | 湍流燃烧 | 127 |
| 4.7.2 | 扩散燃烧 | 132 |
| 4.8 | 管道气体的燃爆与抑爆 | 139 |
| 4.8.1 | 管道内瓦斯的爆炸机理 | 139 |
| 4.8.2 | 管道气体的爆炸传播影响因素 | 139 |
| 4.8.3 | 管道气体的抑爆技术 | 142 |
| | 习题与思考题 | 142 |
| 5 | 可燃液体的燃烧与爆炸 | 143 |
| 5.1 | 液体燃料的燃烧特点 | 143 |
| 5.2 | 液体的蒸发 | 143 |
| 5.2.1 | 蒸发过程 | 143 |
| 5.2.2 | 蒸气压 | 144 |
| 5.2.3 | 蒸发热 | 146 |
| 5.2.4 | 液体的沸点 | 146 |
| 5.3 | 闪燃与爆炸温度极限 | 146 |
| 5.3.1 | 闪燃与闪点 | 146 |
| 5.3.2 | 同类液体闪点变化规律 | 147 |
| 5.3.3 | 混合液体闪点 | 148 |
| 5.3.4 | 闪点计算 | 149 |
| 5.3.5 | 爆炸温度极限 | 152 |
| 5.4 | 液态可燃物的火灾蔓延 | 155 |
| 5.4.1 | 油池火 | 155 |
| 5.4.2 | 液面火 | 158 |
| 5.4.3 | 含油的固面火 | 160 |
| 5.4.4 | 液雾中的火蔓延 | 161 |
| 5.5 | 油罐火灾燃烧 | 164 |
| 5.5.1 | 液体的稳定燃烧 | 164 |
| 5.5.2 | 原油和重质石油产品燃烧时的沸溢和喷溅 | 171 |
| 5.6 | 加油站储油罐燃烧与爆炸 | 174 |
| 5.6.1 | 汽油的闪点与燃点 | 174 |
| 5.6.2 | 加油站爆炸原因分析 | 174 |
| 5.6.3 | 火源分析 | 176 |
| | 习题与思考题 | 176 |
| 6 | 可燃固体的燃烧与爆炸 | 178 |
| 6.1 | 固体燃烧概述 | 178 |

| | |
|--------------------------|------------|
| 6.1.1 固体燃烧的形式 | 178 |
| 6.1.2 评价固体可燃性的参数 | 178 |
| 6.2 固体着火燃烧理论 | 179 |
| 6.2.1 固体引燃条件和引燃时间 | 180 |
| 6.2.2 固体火焰传播理论 | 182 |
| 6.2.3 固体着火和燃烧的影响因素 | 183 |
| 6.3 煤燃烧 | 187 |
| 6.3.1 煤的成分及分类 | 187 |
| 6.3.2 煤的燃烧过程 | 188 |
| 6.3.3 煤燃烧过程的影响因素 | 189 |
| 6.4 固体阴燃 | 190 |
| 6.4.1 阴燃的发生条件 | 190 |
| 6.4.2 阴燃的传播理论 | 191 |
| 6.4.3 阴燃的影响因素 | 192 |
| 6.4.4 阴燃向有焰燃烧的转变 | 194 |
| 6.5 粉尘爆炸 | 195 |
| 6.5.1 粉尘爆炸的条件 | 195 |
| 6.5.2 粉尘爆炸的过程和特点 | 196 |
| 6.5.3 粉尘爆炸的重要特性参数 | 197 |
| 6.5.4 粉尘爆炸的影响因素 | 198 |
| 6.5.5 粉尘爆炸的预防和控制 | 204 |
| 6.6 炸药爆炸 | 208 |
| 6.6.1 炸药的爆炸特点及其分类 | 208 |
| 6.6.2 炸药的爆炸性能 | 208 |
| 6.6.3 炸药的爆炸及其破坏机理 | 211 |
| 6.6.4 炸药的殉爆 | 212 |
| 6.6.5 炸药的安全与安全炸药 | 213 |
| 6.7 铝粉的燃烧与爆炸 | 215 |
| 6.7.1 铝粉的危险特性 | 216 |
| 6.7.2 铝粉火灾特点 | 216 |
| 6.7.3 铝粉粉尘的爆炸机理 | 216 |
| 6.7.4 铝粉粉尘爆炸的危害 | 217 |
| 6.7.5 铝粉火灾有效灭火措施 | 217 |
| 习题与思考题 | 218 |
| 附录 专业名词汉英对照 | 219 |
| 参考文献 | 221 |

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 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 的能量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 ΔE_1 ，状态 K

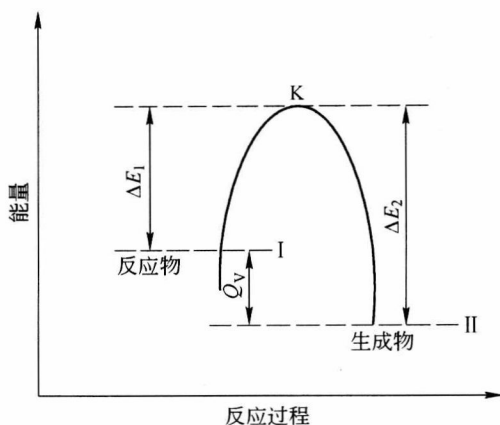


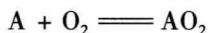
图 1-1 活化能示意图

与状态 II 的能级之差等于逆向反应的活化能 ΔE_2 ， ΔE_2 与 ΔE_1 之差 ($\Delta E_2 - \Delta E_1$) 等于反应热效应。

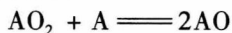
活化能理论指出了可燃物和助燃物两种气体分子发生氧化反应的可能性及其条件。

1.1.2.2 过氧化物理论

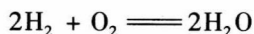
过氧化物理论认为，分子在各种能量（热能、辐射能、电能、化学反应能）的作用下可以被活化。比如在燃烧反应中，首先是氧分子 ($O=O$) 在热能作用下活化，被活化的氧分子的双键之一断开，形成过氧基 $-O-O-$ ，这种基能加合于被氧化物的分子上而形成过氧化物：



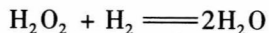
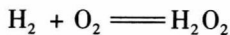
在过氧化物的成分中有过氧基 ($-O-O-$)，这种基中的氧原子较游离分子中的氧原子更不稳定。因此，过氧化物是强烈的氧化剂，不仅能氧化形成过氧化物的物质 A，而且也能氧化用分子氧很难氧化的其他物质 B：



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：

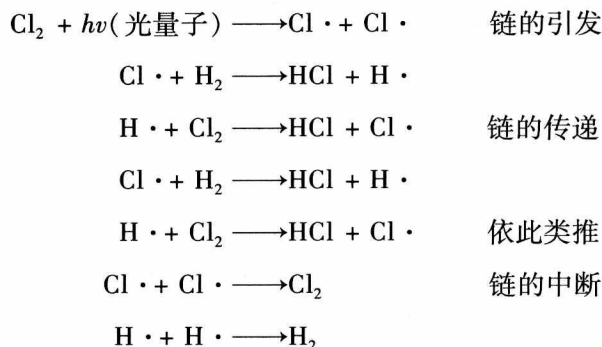


有机过氧化物通常可看做过氧化氢 $H-O-O-H$ 的衍生物，其中，有 1 个或 2 个氢原子被烃基取代而成为 $H-O-O-R$ 或 $R-O-O-R$ 。所以，过氧化物是可燃物质被氧化时的最初产物，它们是不稳定的化合物，能够在受热、撞击、摩擦等情况下分解产生自由基和原子，从而又促使新的可燃物质氧化。

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，氧分子也必须加和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 个阶段：（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或惰性分子互相碰撞而将能量分散、撞击器壁而被吸附等。

1.1.3 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与，此外还要有引发燃烧的能量。具体包括：

（1）可燃物（还原剂）。不论是气体、液体还是固体，也不论是金属还是非金属，无机物还是有机物，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 (氧化剂)。凡是与可燃物结合能导致和支持燃烧的物质, 都称为助燃物。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、自燃发热、化学反应热、电火花、光热射线等。

上述 3 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热量等。燃烧发生时, 三要素可表示为封闭的三角形, 通常称为着火三角形, 如图 1-2(a) 所示。

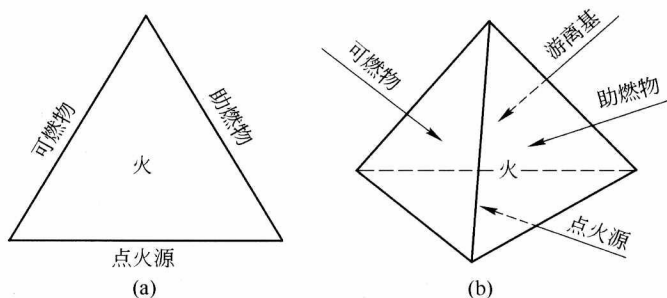


图 1-2 着火三角形和着火四面体

(a) 着火三角形; (b) 着火四面体

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 1-2(b) 所示。

1.1.4 爆炸及其特征

1.1.4.1 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的现象。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) 以极快的速度释放出来, 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; 工程建设中的爆破是人为受控、造福人类的爆炸; 人们生产生活中的意外爆炸是事故性爆炸, 如矿山井下瓦斯爆炸, 锅炉、压力容器爆炸, 粮食粉尘爆炸等。

前面所谈到的几种爆炸现象, 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, 同时还伴有或大或小的声响效应。

1.1.4.2 爆炸的特征

如上所述, 爆炸是物质的一种急剧的物理、化学变化, 在变化过程中伴有物质所含能

量的快速释放，释放出的热量变为对物质本身、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，爆炸有以下特征：

(1) 爆炸的内部特征，物质爆炸时，大量能量在有限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，对邻近介质形成急剧的压力突跃和随后的复杂运动。

(2) 爆炸的外部特征，爆炸介质在压力作用下，表现出不寻常的移动或机械破坏效应以及介质受震动而产生的音响效应。

1.1.5 爆炸理论

1.1.5.1 爆炸链式反应学说

爆炸的链式反应学说阐明了一个很重要的现象，即微量杂质对着火限度的影响。当杂质的分子与链式的中间活化分子相遇时，能使链中断。自然，那些在链继续发展时可能发生的所有反应，以后就不会发生。杂质与分子相遇时，可能产生新的链，因此，可能造成接踵而来的一个新链式反应。链式反应学说将爆炸的研究领域与分子构造及其相互作用的物理学说彼此联系起来。

链式反应学说可以用来说明燃烧限度，即在混合物中可燃物含量的最高极限和最低极限（在极限外物质不能爆炸）；也可以说明用惰性混合物冲淡可燃混合物，使之不能着火的现象。此现象可以用锁链中断及气体的冷却作用来解释，因为在爆炸扩展时，大部分热量用于加热不参加反应的惰性气体。

链式反应学说还能说明，爆炸不是在达到着火的临界条件时就立即发生，而是经过链发展所必需的一定的时间后才能发生。因此，任何爆炸都有时间上的延滞。此延滞时间视链发展的历程与外界条件而定，可以为十万分之几秒到数小时。

1.1.5.2 爆炸波学说

可以利用爆炸波学说解释可燃气体、蒸气-空气的混合物的爆炸。

爆炸波学说的主要内容是：当外界的冲击作用于有爆炸危险的混合物时，如其冲击力足以使该物质迅速分解，则各种加速爆炸的现象便依次发生。在有爆炸危险的物质中，所有能引起爆炸的能量都变为热能，引起冲击。此冲击与反应中生成的气体分子运动的加速度有关。气体的冲击能使一层爆炸物被加热和分解，此层物质变为气体，并依次冲击到新的一层上。由此可见，爆炸是从冲击处以辐射状向外扩展的，并发生机械的、热的和化学的相互交替作用，这就是爆炸波这一名词的由来。

1.1.5.3 爆炸电子本性假说

电子学说以原子间结合得不牢固来解释爆炸物质的不稳定性。在普通的化学反应中，外面的电子也能够从一个原子跳到另一个原子上。那么可以假定，在某些特别灵敏的爆炸性化合物中，价电子的结合就更弱。因此，在雷管中，甚至在很小的冲击下，也会发生分子的变化，同时不仅以热的形式放出能量，并且还放出带有动能的游离电子。

1.1.5.4 流体动力学爆炸理论

流体动力学的爆炸理论认为，爆炸是冲击波在炸药中传播而引起的。冲击波在炸药中传播可能有两种不同的情况。一种情况与在惰性介质中传播的冲击波相似，即不引起炸药