

燃烧学基础

Fundamental Theory of Combustion

燃烧学

顾 璠 黄亚继 刘道银 编



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

燃烧学基础

顾 璠 黄亚继 刘道银 编



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 提 要

本书是动力工程类本科生燃烧学的基础教材,教材编写力图系统阐述燃烧科学的完整理论体系,兼顾燃烧技术的内容,以适应理工科的共同教学需要。本书突出燃烧学的可用性和应用性,强调燃烧问题的计算方法。教材撰写采用讲义风格,纲目贯穿全书,要点明确。本书共分10章,第1章概论介绍了燃烧科学的发展和燃烧的基本概念;第2章至第4章内容是构成燃烧学的基础科学,包括燃烧热力学、传质学和化学动力学;第5章至第7章是气相燃烧的概念、理论和方法;第8章和第9章是液体燃料和固体燃料的燃烧理论和方法;第10章为燃烧污染问题的综述。

本书可作为高等学校能源动力类学科本科生教材,也可用作该专业工程硕士及从业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧学基础 / 顾璠, 黄亚继, 刘道银编. —南京:
东南大学出版社, 2019.8

ISBN 978-7-5641-8524-4

I. ①燃… II. ①顾… ②黄… ③刘… III. ①燃烧学—高等学校—教材 IV. ①O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 182874 号

燃烧学基础

Ranshaoxue Jichu

编 者: 顾 璠 黄亚继 刘道银

出版发行: 东南大学出版社

社 址: 南京市四牌楼2号 邮编: 210096

网 址: <http://www.seupress.com>

出 版 人: 江建中

印 刷: 江苏凤凰数码印务有限公司

排 版: 南京新翰博图文制作有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 19.5 字数: 350 千字

版 印 次: 2019年8月第1版 2019年8月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5641-8524-4

定 价: 46.00 元

经 销: 全国各地新华书店

发行热线: 025-83790519

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真): 025-83791830

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

前 言

燃烧是一种人们广为熟知的自然界现象,伴随着人类工业革命,燃烧持续运用于各种工程技术,直至今日。作为燃烧技术的理论基础,燃烧学亦经历了近百年发展,日臻成熟,成为一门系统的科学理论。

广义上的燃烧学包含了对阴燃、火焰、爆燃爆炸等现象的科学描述,能源、动力、矿产、航空、航天诸多基础领域均应用各种燃烧技术,涉及之广,渗透之深,丝毫不逊机械、电子等基础学科于工业技术之重要性。

不同的领域燃烧技术往往在技术特征方面存在很大区别,乃至有了诸多不同燃烧学分支,对于一般非专业人士而言,燃烧学显得十分庞杂。然而,无论何种燃烧学分支,皆可以从燃烧学基础出发加以描述和研究。因此,凡从事或将从事涉及燃烧问题的专业人士,学习和掌握燃烧学基础不可或缺,换言之,燃烧学基础是广泛领域工业技术人员的必备基础专业知识之一。

燃烧学长期以来被视为繁杂难学,这是源于燃烧学理论体系的完整建立,也不过是近二三十年的事,早期的燃烧学理论受限于当时的认知条件,往往偏颇于燃烧局部科学问题的描述。事实上,燃烧恰恰是物理化学多学科高度耦合的有机过程,侧重一面的燃烧学难窥燃烧理论全貌。

学习燃烧学是需相当的物理和化学基础的。燃烧现象贯穿了数个物理和化学过程,燃烧理论必然也是相关物理、化学过程的科学理论所组成。因此,燃烧学的学习本质上是了解燃烧学理论体系的构架,并进一步掌握相关学科的有机组成和相互作用;某种意义上,对燃烧学体系的理解远比对某个燃烧模型的学习来得重要,更不应拘泥于局部理论公式的推演和记忆。

基于燃烧学的科研、技术应用和专业教学的思考,编撰中考虑了以下两个方面:

首先,全书的知识结构。第1章开宗明义介绍了燃烧学理论体系,第2章至第4章补充完成燃烧学所需基础知识,其中流体力学、传热学和部分热力学被认为是已学基础知识,至此,完备了燃烧学所需组成学科知识。第5章至第7章介绍了各个组成学科知识运用于基本燃烧问题,以及引出一些燃烧基本概念和特

征。第8章至第9章涉及的燃烧问题既是燃烧理论对燃烧技术应用阐述,亦是一些热能工程领域燃烧技术的一般介绍,起到资料索引作用而非技术设计指导,满足一般工程技术人员需要。涉及燃烧污染的概念、技术原理和方法则在第10章进行了描述。

其次,燃烧理论体系的重点阐述。其一,燃烧学理论体系观点全书反复出现,贯穿全书。其二,对每个燃烧问题分析,强调理论体系中某个物理或化学过程的关键控制作用,强化了燃烧学体系观点。最后,突出知识系统性和连贯性,鉴于燃烧学由多学科理论组成、知识点众多的特点,编撰中力图知识点前后呼应并说明出处,便于理解燃烧学知识体系的完整性。

全书由顾璠主编,第1—9章由顾璠编写,第10章由黄亚继编写,全书例题、习题及表格由刘道银编写。撰写采用了讲义风格,便于读者阅读和记忆。本书总体而言是在前人多部燃烧学专著、教材基础上的再编撰,其中,局部内容的改变和重述,期待读者的指正。

编者

2019年初夏



目录

CONTENTS

第 1 章 概论	1
1.1 燃烧科学技术意义	1
1.2 燃烧学历史及发展	2
1.2.1 燃烧科学起源	2
1.2.2 现代燃烧科学建立	2
1.3 燃烧基本概念	4
1.3.1 燃烧的定义	4
1.3.2 燃烧类型	4
1.3.3 燃烧的特征	6
1.3.4 燃烧的基本形式	7
1.4 燃烧学理论基础	7
1.4.1 燃烧学的理论问题	7
1.4.2 燃烧学基础学科构成	8
1.5 燃料	10
1.5.1 燃料的定义	10
1.5.2 燃料的种类	10
1.5.3 气体燃料	11
1.5.4 液体燃料	12
1.5.5 固体燃料	13
第 2 章 燃烧化学热力学基础	16
2.1 混合气体系统的热力学	16
2.1.1 热力系统状态函数	16
2.1.2 理想气体混合物	19
2.1.3 气体输运系数	20
2.2 燃烧反应系统热力学第一定律	26
2.2.1 闭口系统	26

2.2.2	开口系统	27
2.3	化学反应热与燃料热值	28
2.3.1	热化学方程式与反应热	28
2.3.2	Hess 定律	29
2.3.3	燃烧反应热和燃料热值	29
2.4	绝热燃烧温度	33
2.4.1	定压绝热燃烧温度	33
2.4.2	定容绝热燃烧温度	35
2.5	燃烧反应质量平衡计算	36
2.5.1	化学反应当量比	36
2.5.2	燃烧反应的空气量和烟气量	38
第 3 章	燃烧传质学基础	41
3.1	传质学基本概述	41
3.1.1	传质的定义	41
3.1.2	传质的形式	42
3.1.3	燃烧相关传质问题	43
3.2	分子扩散	44
3.2.1	分子扩散基本概念	44
3.2.2	分子扩散基本定律	46
3.2.3	分子扩散的分子运动论	48
3.3	对流传质	50
3.3.1	近壁面处传质过程	50
3.3.2	对流传质速率公式	51
3.3.3	对流传质常用准则数	52
3.3.4	对流传质关联式	53
3.4	传质微分方程	54
第 4 章	化学动力学	59
4.1	化学宏观反应与基元反应	59
4.1.1	化学宏观反应	59
4.1.2	基元反应	60
4.2	化学反应动力学	62
4.2.1	浓度的定义	62
4.2.2	化学反应速率	62

4.2.3	化学反应速率方程	64
4.2.4	化学反应分子动力学模型	67
4.2.5	化学反应速率系数	69
4.2.6	影响燃烧化学反应速率的因素	73
4.3	化学反应机理	75
4.3.1	概述	75
4.3.2	链式反应	76
4.3.3	燃烧化学反应机理	78
第5章	气体燃烧与着火	82
5.1	气体燃烧基本概念	82
5.1.1	气相燃烧与气固燃烧概念	82
5.1.2	气体燃烧火焰及分类	83
5.1.3	气体燃烧火焰唯象性质	84
5.2	着火概述	86
5.2.1	着火基本概念	86
5.2.2	着火方式	88
5.2.3	着火原理	89
5.2.4	着火科学本质及理论方法	92
5.3	热自燃着火	92
5.3.1	热自燃着火理论	93
5.3.2	热自燃着火影响因素	96
5.3.3	热自燃着火温度	98
5.3.4	热自燃着火界限	101
5.3.5	热自燃感应期	105
5.4	强迫着火	106
5.4.1	点燃的特征	106
5.4.2	点燃方法	107
5.4.3	炽热固体点燃热力理论	108
5.4.4	点燃最小能量	110
5.5	气体火焰燃烧稳定	110
5.5.1	气体火焰燃烧稳定机理	111
5.5.2	气体火焰稳定方法	114
5.6	气体燃烧器	116
5.6.1	气体燃烧器工作原理与特点	116

5.6.2	有焰气体燃烧器	118
5.6.3	无焰气体燃烧器	120
第 6 章	气体预混火焰燃烧	124
6.1	概述	124
6.1.1	预混火焰特征	125
6.1.2	火焰传播速度	128
6.1.3	层流预混火焰结构特性	130
6.1.4	预混燃烧机理本质及理论方法	132
6.2	层流预混火焰理论	134
6.2.1	层流预混火焰能量模型	134
6.2.2	守恒方程	134
6.2.3	理论模型分析	136
6.3	层流预混火焰稳定机理	142
6.3.1	层流预混火焰第一稳定条件	142
6.3.2	层流预混火焰第二稳定条件	144
6.4	影响层流预混火焰传播速度的因素	147
6.4.1	未燃预混气体初始温度 T_0 的影响	147
6.4.2	混合气体压力 p 的影响	148
6.4.3	气体燃料种类的影响	150
6.5	湍流预混火焰	150
6.5.1	概述	150
6.5.2	预混火焰湍流模式与理论模型	152
第 7 章	气体扩散火焰燃烧	156
7.1	概述	156
7.1.1	气体层流扩散火焰性质	156
7.1.2	气体湍流扩散燃烧概述	161
7.1.3	气体扩散燃烧原理	162
7.1.4	气体扩散燃烧的射流形式	165
7.1.5	扩散燃烧机理本质及理论方法	166
7.2	层流扩散火焰理论	168
7.2.1	层流射流特性	168
7.2.2	扩散燃烧模型	169
7.2.3	层流射流边界层积分解	170

7.2.4	气体组分的组合分数	173
7.2.5	模型理论解与火焰长度	176
7.3	气体湍流扩散火焰	179
7.3.1	气体湍流扩散火焰性质	179
7.3.2	湍流理论模型	181
第 8 章	液体燃料燃烧	184
8.1	概述	184
8.1.1	可燃液体燃烧性质	184
8.1.2	液体燃料燃烧简述	187
8.2	油滴燃烧理论分析	189
8.2.1	油滴燃烧理论模型	189
8.2.2	静止气体中油滴的燃烧	191
8.2.3	对流气流中油滴燃烧	199
8.3	油雾燃烧	202
8.3.1	概述	203
8.3.2	液体雾化	205
8.3.3	燃烧两相流理论方法	208
8.4	液体燃料燃烧技术	210
8.4.1	雾化器	210
8.4.2	燃油燃烧器	214
第 9 章	固体燃料燃烧	217
9.1	概述	217
9.1.1	固体燃烧形式	217
9.1.2	气固燃烧反应原理	221
9.1.3	固体燃料燃烧方式	222
9.2	碳粒燃烧理论	223
9.2.1	碳燃烧化学动力学模型	224
9.2.2	碳粒燃烧模型	226
9.2.3	碳粒着火模型	233
9.3	煤燃烧	235
9.3.1	概述	235
9.3.2	煤热分解	238
9.3.3	焦炭燃烧	240

9.3.4	煤燃烧技术	243
9.4	煤层床燃烧	244
9.4.1	层床燃烧机理	244
9.4.2	层床类型及工作原理	245
9.4.3	交叉式移动层床燃烧	246
9.4.4	燃煤层床工业炉	247
9.5	煤流化床燃烧	250
9.5.1	概述	250
9.5.2	流化床燃烧过程	252
9.5.3	流化床燃烧特性	253
9.5.4	流化床锅炉	253
9.6	煤粉燃烧	256
9.6.1	概述	256
9.6.2	煤粉旋流射流燃烧	258
9.6.3	煤粉直流射流燃烧	261
第 10 章	燃烧污染与防治	265
10.1	概述	265
10.2	燃烧硫氧化物生成与防治	267
10.3	燃烧氮氧化物的生成与防治	278
10.4	燃烧颗粒物的生成与防治	288
10.5	燃煤过程中重金属迁移及其污染防治	293
主要参考文献		301

第1章 概 论

燃烧与人类生产活动密切相关,它广泛出现在各个生产过程,涉及能源、交通、航天、航空、冶金和化工等诸多领域。燃烧技术在工业领域和人们的日常生活都具有广泛应用,迄今为止,燃烧对于人类社会的生产、生活仍然具有非常重要的意义。

1.1 燃烧科学技术意义

热能利用的主要方式是通过燃烧实现的。燃料中的化学能在燃烧过程中放出热能,然后再通过能量转换,转换为其他需要的能量形式,例如广为应用的电能。所以在能源工业过程中,燃烧仍然起着至关重要的基础性的作用。

能源是国民经济的重要基础,与人们的日常生活密切相关,其重要性不言而喻。能源的获取主要通过热能转换方法。尽管现代科技的发展使得能源来源多样化,但是,热能利用仍然是能源生产的主要方法,在我国尤其如此。

现代能源工业生产的主要形式是热力发电,包括燃煤热力发电和燃气热力发电。前者通过煤在锅炉中的燃烧实现电能转换,后者通过天然气在燃气轮机中的燃烧完成电能转换。燃烧技术是热力发电的关键技术之一。

燃烧技术的另一个重要应用是交通领域,人们日常生活中最常见的交通工具,例如汽车、船舶和飞机,其动力装置都涉及燃烧技术。汽车和船舶的动力装置——内燃机的工作原理是以燃烧技术为基础,油燃料通过燃烧的形式释放出热能,转化为动能推动运输装置的运动。航空发动机的燃烧亦是关键技术之一,其工作原理同样是油燃料燃烧转化为推动力。

冶金、化工、建材等众多的工业领域广泛应用燃烧技术。钢铁和金属冶炼业中原材料的准备、热处理等工艺中都涉及燃烧现象;化工工业燃烧装置包括锅炉、精炼和化工流体加热器、玻璃熔化、固体干燥等;水泥窑炉也大量使用燃料燃烧释放热能。

火灾是燃烧技术运用的一个特殊方面,燃烧在意外发生或失去控制后可能引起火灾或爆炸等灾害,造成人员的伤亡和财产损失。在前面陈述的燃烧技术都是以促进燃烧为目的,唯火灾燃烧是考虑如何抑制燃烧发生。

1.2 燃烧学历史及发展

“燃烧”是自然界火的学术称谓。

早在远古时代,火的使用使人类从野蛮状态走向文明,恩格斯在《自然辩证法》一书中曾说:“人们只有在学会摩擦起火之后,才第一次使无穷无尽的自然力替自己服务。”人类真正认识火的本质,科学地解释这一现象,至今仅有两百多年的历史。

1.2.1 燃烧科学起源

在古代,由于科学技术和生产力水平的限制,人类对于火的认识非常有限,不可能探究和建立关于火的科学理论——燃烧学。中国的五行说“金、木、水、火、土”,古希腊的四元素说“水、土、火、气”,古印度的四大学说“地、水、火、风”等,都涉及火,古人认为火是自然界最基本的要素之一。

在欧洲 10 世纪以前,人们认为物质燃烧取决于一种特殊的“燃素”。到 18 世纪中叶,科学相对进步的欧洲仍然被错误的“燃素说”所统治。“燃素说”是德国化学家斯塔尔(G. E. Stahl, 1660—1734)在《化学基础》一书中提出的,“燃素说”的核心观点是“火的微粒由燃素构成,物质燃烧释放出燃素,有些物质不能燃烧是因为缺少燃素”,这种观点统治了欧洲将近一百年的时间。18 世纪 80 年代,法国化学家拉瓦锡(A. L. Lavoisier, 1743—1794)先后在《燃烧理论》和《化学纲要》两部著作中对燃烧进行了合理解释,首次提出燃烧是一种“氧化反应”的观点。俄罗斯科学家罗蒙诺索夫(M. B. Ломоносов, 1711—1765)根据实验也得到了相同的结论。“燃烧是物质氧化”理论的出现,才使得人类才对燃烧有了真正的认识。

1.2.2 现代燃烧科学建立

19 世纪中叶,工业革命的成功促使化学工业蓬勃发展;分子学说的建立,使得人们开始使用热化学及热力学的方法来研究燃烧现象,相继发现了燃烧热、绝热燃烧温度、燃烧产物平衡成分等燃烧特性。

20 世纪初,苏联化学家谢苗诺夫(N.N.Semenov, 1896—1986)和美国化学家刘易斯(W.K.Lewis, 1882—1975)等人发现,影响燃烧速率的重要因素是反应动力学,而且燃烧反应有分支链式反应的特点,即中间生成物可以加速燃烧过程。20 世纪 20 年代,苏联科学家泽尔道维奇(Y.B.Zeldovich, 1914—1987)、弗兰克-卡梅涅茨基(D.A.Frank-Kamenetsky)及美国的刘易斯等人又进一步发现燃烧过程是化学动力学与传热、传质等物理因素相互作用的过程,建立了着火和火焰传播理论,认为燃烧现象,无论是着火、熄灭和火焰传播,还是缓燃和爆震等,都是化学反应动力学和传热传质等物理因素的相互作用。

20 世纪中叶,在研究了预混火焰和扩散火焰、层流燃烧、湍流燃烧、油滴燃烧和碳粒燃烧等基本规律之后,科学家们发现控制燃烧过程的不仅仅是化学反应动力学,流体动力学也是重要的影响因素之一。至此,燃烧理论初步完成。

20 世纪 40~50 年代,航空、航天技术的发展,使燃烧的研究由一般动力机械扩展到喷气发动机、火箭和飞行器头部烧蚀等问题中,并取得了迅速的发展。许多人运用黏性流体力学和边界层理论对层流燃烧、湍流燃烧、着火、火焰稳定和燃烧振荡等问题进行了更深入的定量分析。到了 20 世纪 70 年代初,由于电子计算机的出现,科学家运用计算流体力学方法来研究燃烧问题,将燃烧学、反应流体力学、计算流体力学和燃烧室工程设计有效地结合起来,出现了一系列流动、传热、传质和燃烧的数学模型和数值计算方法,把燃烧学的基本概念、化学流体力学理论、计算流体力学方法和燃烧室的工程设计有机地结合起来,开辟了研究燃烧理论及其应用的新途径。

20 世纪 70 年代中期以来,燃烧测量技术的进步进一步推动了燃烧科学的发展,应用激光技术和气体分析技术开始用于直接测量燃烧过程中气体和颗粒的温度、速度、组分浓度等参数,这些测量结果加深了人们对燃烧现象的认识。随后,燃烧学开始与湍流理论、多相流体力学、辐射传热学和复杂反应的化学动力学等学科交叉渗透,使得燃烧理论发展到了更高的阶段。

燃烧学是一门仍在发展中的学科。能源、航空航天、环境工程和火灾防治等方面都提出了许多有待解决的重大问题,诸如高强度燃烧、低品位燃料燃烧、煤浆(油-煤,水-煤,油-水-煤等)燃烧、流化床燃烧、催化燃烧、渗流燃烧、燃烧污染物排放和控制、火灾起因和防止等。燃烧学的发展将进一步与湍流理论、多相流体力学、辐射传热学和复杂反应的化学动力学等学科的发展相互渗透、相互促进。

1.3 燃烧基本概念

1.3.1 燃烧的定义

燃烧是指可燃物跟氧化剂发生的一种发光、发热的具有一定反应速率的化学反应。发光、放热、发烟、伴有火焰是它的基本特征。这个定义强调了化学反应对于燃烧现象的本质重要性,同时也强调了燃烧过程中可燃物内存储的化学能量转化为热能的能量转换在实际应用中的可能性。

本质上来说,燃烧就是快速的发光发热的氧化反应,它是氧化还原反应中的一种,但是,并非所有的氧化反应都是燃烧。从热力学角度来说,氧化反应必然是放热反应。

狭义上的燃烧通常是指可燃物与氧气的快速氧化反应,氧化剂通常是氧气。广义上的燃烧指任何发光发热的剧烈的氧化反应,氧化剂可以是非氧气的其他氧化物,比如金属钠和氯气反应生成氯化钠,该反应具有剧烈的发光发热现象,同样属于燃烧范畴。

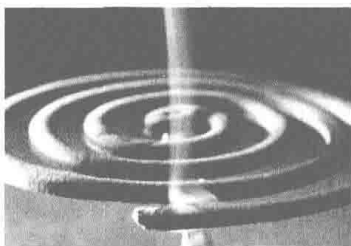
1.3.2 燃烧类型

燃烧按其燃烧化学反应速率的快慢,可分为三种宏观类型:阴燃、火焰燃烧和爆炸,它们之间有时并没有明确的区分界限,尤其阴燃和火焰燃烧之间。

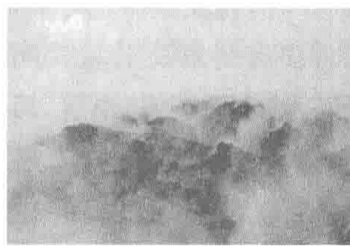
1) 阴燃

阴燃是燃烧中化学反应速率最慢的一种,是固体燃烧的一种形式。

阴燃是日常生活中常见的燃烧现象,蚊香、香烟的燃烧都属于阴燃,堆煤场发生的自燃也是煤以阴燃的形式燃烧的(图 1.1)。阴燃是不发光的缓慢燃烧并伴随有较大的烟雾,它与火焰燃烧的区别是有无火焰现象。



(a) 蚊香点燃



(b) 堆煤场自燃

图 1.1 阴燃现象

在燃烧学中,阴燃和火焰燃烧并无严格的界定。阴燃是小尺寸空间的燃烧,发生在可燃固体堆积物的空隙和可燃物自身的孔隙中。阴燃是固体燃烧,但是,自发形成的阴燃过程中,固体必须有分解析出可燃气体的性质,分解出的可燃气体燃烧与固体可燃物表面的燃烧相互促进,才能出现稳定的阴燃现象。因此,阴燃的自然发生需要一定的条件,不是所有固体可燃物堆积或多孔固体可燃物都能形成稳定的阴燃。

在一定条件下阴燃可以转化为火焰燃烧。

2) 火焰燃烧

火焰燃烧是燃烧中化学反应速率较快的一类,绝大多数的燃烧均以火焰的形式呈现。

火焰燃烧是最常见的燃烧形式,也是人类最早利用的燃烧形式。煤气灶、打火机的火苗就是火焰燃烧(见图 1.2)。火焰燃烧运用最广泛,燃烧学对火焰燃烧的描述和性质了解也是最全面的。

在能源动力等大多数的工业领域,燃烧设备均采用的是火焰燃烧的方式。

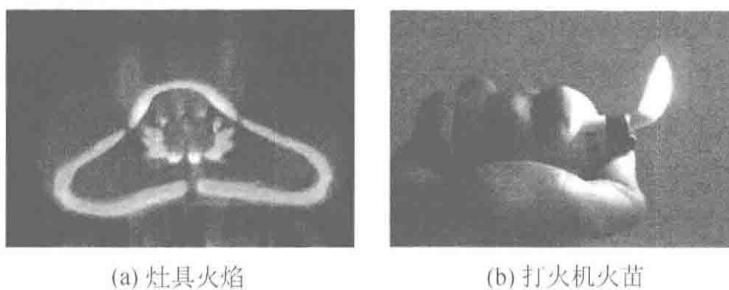


图 1.2 火焰燃烧现象

3) 爆炸

爆炸在燃烧学中也被称为爆震,是燃烧中化学反应速率最快的一类。

爆炸在极短时间内释放出大量能量,产生高温,并排放出大量气体,在周围介质中造成高压的化学反应或状态变化,反应速率极快,高温条件下产生的气体和周围的气体共同膨胀,使化学反应能量直接转变为压力能,在压力释放的同时产生强光、热和声响。

在日常生活中,绝大多数人接触不到爆炸,人们对爆炸的感知是通过媒体媒介得到的,对此并不陌生(图 1.3)。从燃烧学角度,爆震只是燃烧中的一类,与阴燃、火焰燃烧并无根本上的区别,只是燃烧化学反应速率的快慢不同,它被视为一种强烈的燃烧现象。

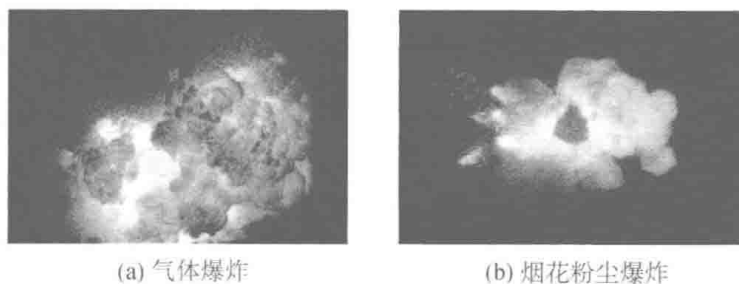


图 1.3 爆震(爆炸)现象

1.3.3 燃烧的特征

燃烧区别于一般氧化还原反应,其主要特征是燃烧过程中通常伴有大量的热量释放、发光和形成烟气现象。所以,燃烧过程不仅是化学反应动力学过程,还包含了其他微观物理过程,使得燃烧具有一些自身的特征。

1) 热辐射特性

燃烧具有强烈的热辐射,这是被人们直接感知的燃烧特性。以火焰燃烧为例,火焰的辐射来源于三部分:首先是热辐射,其次是化学发光辐射,最后是碳粒和炽热固态烟粒的辐射。

热辐射来自火焰中一些化学性能稳定的燃烧产物的光谱带,如 H_2O 、 CO_2 以及各种碳氢化合物等。这类辐射的波长一般处于 $0.75\ \mu\text{m}\sim 0.1\ \text{mm}$ 之间。其中,最强的光谱带是红外区,它是由燃烧的主要产物 CO_2 和 H_2O 形成的。

化学发光辐射是一种由化学反应而产生的光辐射,燃烧中某些不稳定(或受激发)的中间物质分子内电子发生能级跃迁。根据玻尔理论,原子从一种定态跃迁到另一种定态,它将辐射(或吸收)一定频率的光子,形成了不连续辐射光谱带的发射,电子激发态的各种组分包括了 CH 、 CO 、 OH 等自由基,这些自由基存在于火焰区中,在化学反应瞬间产生。

火焰中也存在着碳粒和固态烟粒发射出的连续光谱。燃烧产物中含有一些微小的颗粒,这种由燃烧或热解作用而产生的悬浮在大气中可见的微粒使火焰辐射增强。微粒的元素成分主要是碳,还有少量的氢原子。

总之,气体、液体或固体燃料的实际燃烧中,火焰和完全燃烧产物的辐射主要来自 CO_2 、 H_2O 、烟粒和飞灰颗粒。

2) 电离特性

燃烧火焰的高温区域会发生一定程度的气体热电离。火焰温度越高,气体热电离度越高。根据等离子体理论,不同的气体具有不同的电离能力。碳氢化