



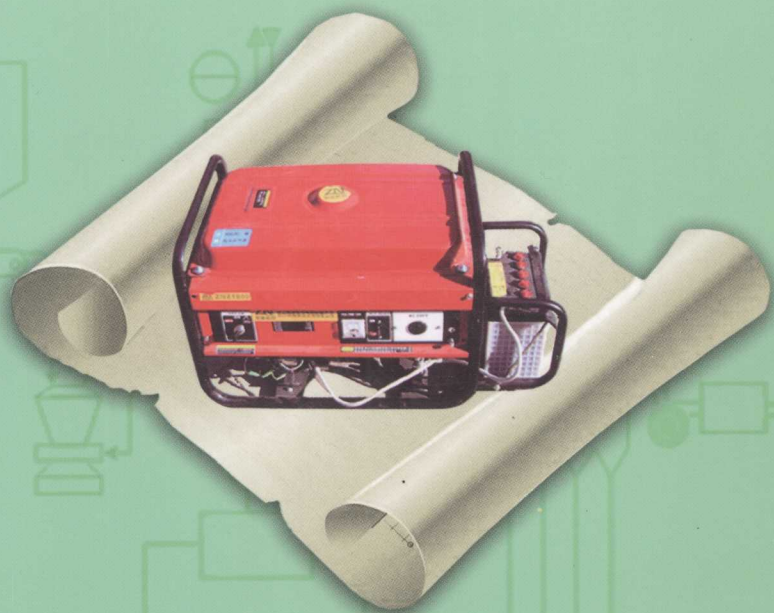
普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等院校可再生能源工程系列教材




燃 烧 学

Ranshaoxue

张全国 主编



 中国农业出版社

014036608

0643.2-43
09

普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等院校可再生能源工程系列教材

燃 烧 学

张全国 主编
北京航空航天大学
图书馆

中国农业出版社



北航

C1723477

0643.2-43
09

图书在版编目 (CIP) 数据

燃烧学 / 张全国主编. —北京: 中国农业出版社,
2013. 5

普通高等教育农业部“十二五”规划教材 全国高等
院校可再生能源工程系列教材

ISBN 978-7-109-17748-2

I. ①燃… II. ①张… 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 (2013) 第 058442 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)
(邮政编码 100125)

策划编辑 马颀晨
文字编辑 李兴旺

北京通州皇家印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 16.25

字数: 385 千字

定价: 31.50 元

出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)



北航

C1723477

全国高等院校可再生能源工程系列教材 编审委员会

- 主任** 李文哲 (东北农业大学)
- 副主任** 张全国 (河南农业大学)
易维明 (山东理工大学)
夏朝凤 (云南师范大学)
- 委员** (按姓名笔画排序)
- 王效华 (南京农业大学)
刘圣勇 (河南农业大学)
刘庆玉 (沈阳农业大学)
刘建禹 (东北农业大学)
刘荣厚 (上海交通大学)
李 明 (云南师范大学)
张衍林 (华中农业大学)
周福君 (东北农业大学)
柏雪源 (山东理工大学)
施正香 (中国农业大学)
秦京光 (农业部规划设计研究院)
郭康权 (西北农林科技大学)
董长青 (华北电力大学)
董良杰 (吉林农业大学)

主 编 张全国
副主编 李志合 关正军 胡建军
编 者 (按姓名笔画排序)

关正军 (东北农业大学)
孙 清 (沈阳农业大学)
李 松 (吉林农业大学)
李永军 (山东理工大学)
李志合 (山东理工大学)
杨世关 (华北电力大学)
张全国 (河南农业大学)
张春梅 (沈阳农业大学)
范振山 (郑州职业技术学院)
赵民善 (河南农业大学)
胡建军 (河南农业大学)
钟 浩 (云南师范大学)
审 稿 易维明 (山东理工大学)
周劲松 (浙江大学)
赵广播 (哈尔滨工业大学)

Preface | 前言

燃烧现象广泛存在于自然界中。从20世纪50年代开始,由于航空和空间技术的迅速发展,引起了许多科学家研究燃烧的兴趣,这大大推动了燃烧科学理论和技术的发展,对人类征服空间起到了重大作用。现在,由于世界性的能源问题、环境污染问题、安全问题(火灾和爆炸)的出现,燃烧科学再次受到人们的重视。随着我国工农业生产的发展和人民生活水平的提高,对能源需求量日益增多,且燃烧工艺普遍落后,燃烧效率低,燃料消耗量大,环境污染严重,因而加强燃烧科学的理论研究和提高燃烧技术水平已成为当务之急。

燃烧科学是一门内容丰富的学科,它主要运用化学动力学、热力学、传热传质学和流体力学等有关理论研究燃烧过程的物理化学本质及燃烧技术。本书限于篇幅,重点阐述各类燃料燃烧的一般现象和规律,分析影响燃烧的各种化学及物理因素,介绍燃烧基本理论在能源利用工程及环境工程中的应用,并探索提高燃料利用率和燃烧技术水平的途径,其中包括近年来的研究成果和经验。同时,考虑到我国以煤炭为主、生物质燃料利用日益得到重视和加强的现状,在全面介绍不同物态燃料燃烧的基础上,适当地突出煤和生物质的燃烧理论与技术。

全书共分10章,包括绪论、燃料、燃料的燃烧计算、燃烧反应动力学、着火与灭火、气体燃料的燃烧、液体燃料的燃烧、固体燃料的燃烧、相似理论在燃烧学中的应用、燃烧污染及其防治等内容。本书由河南农业大学牵头,山东理工大学、东北农业大学、沈阳农业大学、吉林农业大学、云南师范大学、华北电力大学等高等院校大力支持、通力合作而完成。参加编写的人员有:张全国教授(第一章、第二章第一节至第三节、第三章第一节、第四章、第五章、第六章第一节及第四节、第七章第一节至第三节)、李志合副教授(第四章、第九章第一节及第二节)、关正军副教授(第五章、第九章第三节及第四节)、胡建军副教授(第二章第四节、第六章第二节及第三节、第八章第六节及第七节)、孙清副教授(第二章第五节)、赵民善副教授(第三章第三节、第十章)、张春梅副教授(第七章第四节及第五节)、李松副教授(第七章第六节及第七节)、李永军副教授(第七章第八节及第九节)、钟浩副教授(第七章第十节及第十一节)、杨世关副教授(第八章第一节至第五节)、范振山讲师(第三章第二节)。全书由张全国教授任主编,李志合、关正军、胡建军任副主编。

本书素材的积累和正文的编著得到了著名燃烧科学家、中国科学院院士庄逢辰教授和中国高等学校工程热物理研究会理事长、西安交通大学刘志刚教授的指导和帮助,并综合分析了国内外大量的文献和专著,经山东理工大学易维明教授(主审)、浙江大学能源工程学系周劲松教授(副主审)和哈尔滨工业大学能源科学与工程学院赵广播教授(副主审)等同志审阅,提出了不少宝贵意见,对提高本书质量起到了积极的作用。在

本书撰写过程中,得到了大连理工大学沈胜强教授、河南省科学院雷廷宙研究员、中国科学院广州能源研究所吴创之研究员、河南农业大学能源与环境工程系张百良教授等专家的大力支持和帮助,并提供了许多相关资料。另外,河南农业大学刘圣勇、焦有宙、李刚、王艳锦、徐桂转、岳建芝、荆艳艳、王毅、郭前辉等老师以及王素兰、郑戈、李继红、刘振波、王毅、韩滨旭、张相锋、郭婕、任晓、张志萍、蒋丹萍、朱艳艳、袁杭州、赫倚风等研究生在教材编写过程中做了大量工作,河南省科学院能源研究所朱金陵高级实验师、何晓峰研究员、白炜研究员等同志也提供了生物质燃烧的部分研究成果和资料,我们在此深表谢意。

本书在编写过程中,参考了一些国内外有关资料,在此向各位作者表示深深谢意。由于书中内容涉及面广,编者水平有限,难免存在错误或不足之处,敬请读者和同行专家批评指正,以使本书日臻完善。

编 者

2013年2月于郑州

Contents | 目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 燃烧学的重要性	1
第二节 燃烧学基本知识	2
一、燃烧	2
二、火焰	3
第三节 燃烧学的主要内容和研究方法	4
一、燃烧学的主要内容	4
二、燃烧学的研究方法	5
三、燃烧学的应用	5
第四节 燃烧学的发展简史	6
复习思考题	7
第二章 燃料	8
第一节 燃料的分类及其化学组成	8
一、燃料的定义及用途	8
二、燃料的分类	9
三、燃料的化学组成及表示方法	9
第二节 燃料的发热量	14
第三节 固体燃料	16
一、木质燃料	16
二、秸秆燃料	16
三、煤	21
第四节 液体燃料	26
一、石油	26
二、生物质液体燃料	28
第五节 气体燃料	29
一、天然气燃料	30
二、人造气体燃料	30
复习思考题	32
第三章 燃料的燃烧计算	33
第一节 燃烧过程的物质平衡计算	33

一、燃烧反应方程式	33
二、燃烧用空气量的计算	34
三、燃烧产物的计算	38
四、理论空气量和烟气量的估计	44
第二节 烟气分析及计算	45
一、烟气分析	45
二、烟气中一氧化碳含量的计算	46
三、完全燃烧方程式	47
四、过量空气系数的确定	49
第三节 燃烧过程的热平衡	51
一、燃料的燃烧温度	51
二、理论燃烧温度计算	52
三、实际燃烧温度的计算	55
四、影响燃烧温度的主要因素	55
复习思考题	57
第四章 燃烧反应动力学	58
第一节 燃烧反应速度	58
第二节 燃料的燃烧反应	60
一、一氧化碳的燃烧反应	60
二、烃类燃料的燃烧反应	61
复习思考题	63
第五章 着火与灭火	64
第一节 自发着火与灭火的热力理论	64
第二节 强迫点燃的热力理论	69
第三节 简单开口系统的着火与灭火	70
复习思考题	73
第六章 气体燃料的燃烧及其应用	74
第一节 燃烧火焰的传播	74
一、层流时的火焰传播	74
二、湍流时的火焰传播	77
第二节 扩散火焰与预混火焰	78
一、本生灯的燃烧过程及火焰结构	78
二、脱火与回火	80
三、火焰稳定性	81
四、火焰长度	82
五、气体燃料的燃烧方式	84

081	六、燃气燃烧器的分类和要求	85
181	七、大气式燃烧器的结构及特点	86
181	八、大气式燃烧器的头部设计	94
181	九、低压引射器的计算	99
181	十、低压引射大气式燃烧器的设计计算	104
281	第三节 生物质气化燃气的燃烧	106
381	一、生物质气化燃气特性	106
381	二、生物质气化燃气的物性参数	106
381	三、生物质气化燃气的燃烧计算	106
481	四、生物质气化燃气的燃烧反应动力学	108
481	第四节 沼气的燃烧	110
081	一、沼气的成分和物理性质	110
381	二、沼气的燃烧特性	112
081	三、沼气的燃烧方法及沼气燃烧器	117
881	四、沼气的燃烧应用	120
081	复习思考题	122
	第七章 液体燃料的燃烧	123
061	第一节 单颗油滴的燃烧	123
161	第二节 气流中雾化滴群的燃烧	125
431	第三节 液体燃料在点燃式发动机中的燃烧	126
131	一、诱导期燃烧过程	126
881	二、显燃期燃烧过程	127
171	三、后燃期燃烧过程	127
881	第四节 液体燃料在柴油机中的燃烧	127
181	一、柴油机燃烧过程	128
181	二、影响柴油机燃烧过程的主要因素	129
031	第五节 燃油掺水乳化燃烧	130
181	一、燃油掺水乳化燃烧机理	131
881	二、燃油掺水乳化燃烧的特点	132
191	三、乳化燃油的制备	133
805	第六节 重油发泡燃烧	135
805	一、重油发泡燃烧原理	135
005	二、重油发泡燃烧特征	135
805	第七节 富氧燃烧	136
305	一、富氧燃烧原理	136
005	二、富氧燃烧特征	136
815	三、富氧燃烧应用	138
	第八节 稀氧燃烧	140

68	一、稀氧燃烧原理	140
68	二、稀氧燃烧特征	141
10	第九节 低氧燃烧	141
62	一、低氧燃烧原理	141
101	二、低氧燃烧特征	141
601	三、低氧燃烧措施	142
108	第十节 超声波雾化燃烧	142
601	一、超声波雾化燃烧原理	142
101	二、超声波雾化燃烧器类型	143
601	三、超声波雾化燃烧器的频率特性	144
110	四、超声波雾化燃烧器的雾化特性及其燃烧特性	144
011	第十一节 煤油混合燃烧	146
111	一、煤油混合燃烧特点	146
111	二、煤油混合燃料的制备	146
101	三、煤油混合燃料烧嘴	148
101	复习思考题	149
	第八章 固体燃料的燃烧	150
101	第一节 固体燃料的燃烧过程	150
101	第二节 异相燃烧反应速度	151
101	第三节 碳的燃烧理论	154
101	一、碳的氧化反应	155
101	二、碳的气化反应	156
101	三、碳与水蒸气的反应	157
101	第四节 碳燃烧速度与燃尽时间的计算	158
101	第五节 固体燃料颗粒的燃烧	161
101	第六节 煤的燃烧	163
101	一、煤的层状燃烧	163
101	二、煤粉燃烧	183
101	三、煤的沸腾燃烧	193
101	四、煤的旋风燃烧	199
101	第七节 生物质的燃烧	203
101	一、生物质的燃烧机理	203
101	二、生物质燃烧动力学	203
101	三、生物质燃烧特性	205
101	四、影响生物质燃烧的主要因素	205
101	五、生物质燃烧技术	206
101	复习思考题	219

第九章 相似理论在燃烧学中的应用	220
第一节 积分类比的基本原理	220
第二节 流动过程的相似理论	222
第三节 对流换热过程的相似理论	223
一、强制对流换热过程的相似理论	223
二、自然对流换热的相似理论	224
第四节 燃料燃烧过程的相似理论	224
复习思考题	227
第十章 燃烧污染及其防治	228
第一节 概述	228
第二节 烟尘的污染与防治	230
第三节 硫氧化物的污染与防治	231
一、硫氧化物 (SO_x) 的形成及危害	231
二、防治硫氧化物的污染的措施	232
第四节 氮氧化物的污染与防治	233
一、氮氧化物 (NO_x) 的形成及其危害	233
二、防治氮氧化物污染的措施	234
第五节 碳氧化物的污染与防治	235
第六节 碳氢化合物的污染与防治	236
复习思考题	236
附录	237
主要参考文献	245

第一章 绪论

人类的进步和社会的发展离不开燃烧。本章在介绍燃烧三要素及相关理论、火焰的基本特征及类型等基本理论知识的基础上,系统阐述燃烧学的主要内容、研究方法、实际应用及发展历程,提出燃烧学应不断向解决新问题和对燃烧更深入研究的方向发展。

第一节 燃烧学的重要性

燃烧是人类最古老的技术,它的使用,使人类从被动适应自然向积极主动改造自然进化。早在原始社会,我们的祖先就从自然界的雷电现象中学会了利用火。正是有了火,人类开始吃熟食,用火取暖和抵御野兽。火的使用,使人类的安全和寿命有了大幅度提高,为人类后续文明的发展奠定了坚实的基础。恩格斯曾说过“火的利用第一次使人类支配了一种自然力,从而最终把人和动物分开。”相比较原始社会对火的简单利用,奴隶社会和封建社会对火的利用规律进行了初步的探索,他们丰富了着火原料和着火途径并发展出了冶金等技术,大大提高了生产力。在近代社会,人们对燃烧の利用更加完善,无论是第一次工业革命中蒸汽机的使用,还是第二次工业革命中电的使用,都属于燃烧学的应用范畴。今天,燃烧现象和燃烧理论早已被人们广泛地应用在生产生活中。在工业生产中,大约有90%的世界能量供应由化石燃料燃烧提供。在生活中,人们不仅通过燃烧来提供能量,而且利用燃烧现象和燃烧理论进行防火、灭火,进而避免或降低不必要的人员伤亡和财产损失。从人类社会的发展历程来看,不难发现,人类自学会使用火后,生产能力不断提高,社会亦随之进步与发展,因此从某种意义上说,燃烧是推动人类社会发展的动力。

纵观历史,燃烧不仅是推动人类社会发展的动力,而且还是人类可持续发展的有力保障。自工业革命以来,人们对化石能源已进行了近200年的大规模开发利用,过度的开采使全球化石能源濒临枯竭,面临严重的能源危机。据英国石油(BP)全球能源统计报告显示,按目前的开采速度计算,全球石油储量仅可供开采40多年,天然气和煤炭分别仅可供开采67年和164年。而且化石燃料燃烧会排放大量的 CO_2 和 SO_2 等气体,直接污染大气,破坏环境,与当前追求人与自然和谐发展的主题相违背。大力发展和改进现有燃烧技术,不仅能够提高能源利用效率,节省化石能源,而且能够保护环境,减少有害气体排放。提出和完善关于生物质能为代表的可再生能源的燃烧理论,有利于保证人类社会所需能源的可持续供应。

我国是一个耗能大国,研究燃烧理论及其应用对于实现我国低碳经济的发展尤为重要。相比西方发达国家,我国在经济增长方式上还存在着“高投入、高消耗、高排放、不协调、难循环、低效率”的问题,有着较高的节能空间。目前我国每吨标准煤的产出效率仅相当于美国的28.6%、欧盟的16.8%、日本的10.3%;每增加单位GDP的废水排放量比发达国家高4倍,单位工业产值产生的固体废弃物比发达国家高10多倍,因此节能、降耗、减排将是我国当前和今后一个时期保障经济、能源、环境可持续发展的首

要任务。要达到此目的，重要的措施之一就是提高我国能源利用效率。目前提高用能设备的能源利用水平重在研究如何改善燃烧工况，提高燃烧效率，这其中必然涉及燃烧理论的应用。此外我国还有着十分丰富的生物质资源，生物质燃料的燃烧应用亟需相应的理论和技术支撑。

第二节 燃烧学基本知识

一、燃 烧

(一) 燃烧及其特征

燃烧一般指燃料和氧化剂发生剧烈化学反应，同时伴有发热、发光现象的过程。燃烧反应所生成的新物质被称为燃烧产物。发热、发光、生成新物质是燃烧现象的三个特征，如木料燃烧后生成二氧化碳和水分并剩下碳和灰。

燃烧从实质上讲是一种氧化反应。氧气是燃烧中最常见的氧化剂，但氧化并不仅限于和氧的化合，许多没有氧参加的反应也属于燃烧。比如金属镁 (Mg) 和二氧化碳 (CO_2) 反应生成氧化镁 (MgO) 和碳 (C)，该反应虽然没有氧气参加，但是剧烈的发光、发热的化学反应，同样属于燃烧范畴。发生燃烧必须具备三个基本条件：①要有可燃物，如木材、天然气、石油等；②要有助燃物质，如氧气、氯酸钾等氧化剂；③要有一定温度，即能引起可燃物质燃烧的热能 (点火源)。可燃物、氧化剂和点火源被称为燃烧三要素，当这三个要素同时具备并相互作用时就会发生燃烧。

可燃物质状态不同，其燃烧过程也有很大不同。气体可以直接燃烧，其燃烧依赖于自身的氧化分解；液体燃料和固体燃料不能直接燃烧。液体燃料和一些单质固体燃料 (如磷、硫) 需要先蒸发为气态，然后再进行氧化分解。对于成分较为复杂的固体燃料，先氧化分解生成气态和液态物质，然后着火燃烧。

此外，可燃物质状态不同，其燃烧形式亦不同。根据燃烧状态的不同，燃烧可分为混合燃烧和非均相燃烧。混合燃烧是指可燃气体与助燃气体在同一相中进行的燃烧，如氢气在氧气中的燃烧；非均相燃烧则指可燃物与助燃物在非同一相中的燃烧，如酒精 (液相) 在空气 (气相) 中燃烧。根据燃烧反应进行的程度，燃烧又可分为完全燃烧和不完全燃烧。凡是物质燃烧后产生不能继续燃烧的新物质，叫完全燃烧；凡是物质燃烧后，产生还能继续燃烧的新物质，叫不完全燃烧。此外燃料燃烧还存在蒸发燃烧、分解燃烧、阴燃、表面燃烧 (均热型燃烧) 等形式。

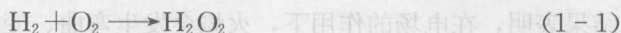
(二) 燃烧相关理论

目前关于燃烧机理，学术界有很多不同的观点，但主流观点有以下三种。

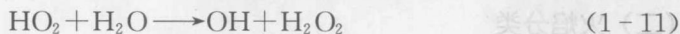
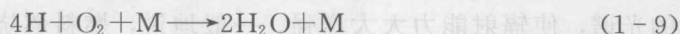
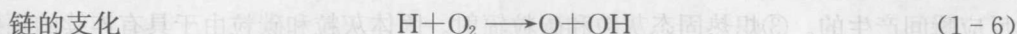
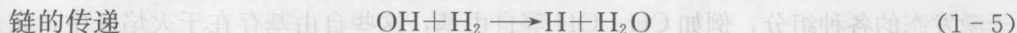
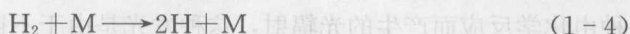
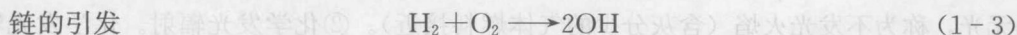
1. 活化能理论 众所周知，分子间化学反应是由分子之间的相互碰撞引起的，但并不是所有相互碰撞的分子都能发生反应，而只有具有一定活化能的少数活化分子碰撞才会发生反应，故该理论认为燃烧是一种分子间的化学反应。当明火接触可燃物时，部分分子获得能量而成为活化分子，有效碰撞次数增多，因而发生燃烧反应。

2. 过氧化物理论 该理论认为，在燃烧反应中氧在热能作用下，被活化而形成 —O—O— 键，使可燃物质变为过氧化物。过氧化物不稳定，在受热、撞击、摩擦等情况下会分解而燃烧、爆炸。如氢和氧的燃烧反应中，首先生成过氧化氢，然后过氧化物与氢反应

生成水，反应过程见式 (1-1)、式 (1-2)。



3. 链锁反应理论 该理论认为，当某种可燃物受热，它不仅会汽化，而且该可燃物的分子会发生热解作用从而产生自由基。气态分子的作用，不是两个分子直接作用得出最后产物，而是活性分子自由基与另一分子作用产生新自由基，新自由基又迅速参加反应，如此延续下去形成一系列的链锁反应，而使燃烧持续进行下去。链反应通常分直链反应和支链反应两种。任何链反应均由三个阶段构成，即链的引发、链的传递（包括支化）和链的终止。以氢、氧支链反应说明：链的引发需有外来能源激发，使分子键破坏生成第一个自由基，见式 (1-3)、式 (1-4)。链的传递（包括支化）是自由基与分子反应，见式 (1-6)、式 (1-7)、式 (1-10)、式 (1-11)，M 为惰性分子。链终止即引向自由基消失的反应，见式 (1-8)、式 (1-9)。



二、火 焰

燃烧过程伴随着火焰的产生。人们平常所说的火焰是指狭义上的火焰，它可以被肉眼明显看到并且释放热量。而燃烧学上所讲的火焰指的是广义上的火焰，它指可燃物与助燃物发生氧化反应时释放光和热量的现象，不一定是肉眼可以明显看到的现象，例如，铁燃烧没有铁蒸气，所以只有火花而无“火焰”。

(一) 火焰的特征

广义上的火焰一般具有以下特征。

1. 发光、发热 火焰可以理解成混合气体的固体小颗粒跟空气中的氧气起反应，受到高温或者其他的的影响，可以以光的方式释放能量，因此发光、发热是火焰的主要特征之一。

2. 电离特性 物质在燃烧变为气态以后，由于从燃烧放热中持续得到能量，当能量积累到一定程度后，它的粒子又可以进一步分裂为带负电的电子和带正电的离子，即原子或分子发生了电离。电离使带电粒子浓度超过一定数量（通常大约需千分之一以上）后，气体的行为虽然仍与平常的流体相似，但中性粒子的作用开始退居到次要地位，带电粒子的作用成为主导，整个物质表现出一系列新的性质。像这样部分或完全电离的气体，其中自由电子和正离子所带的负、正电荷量相等，而整体又呈电中性，行为受电磁场影响，称为“等离子体”。火焰内部其实就是由不停被激发而游动的等离子体组成，在碳氢化合物和空气的燃烧火焰中，特别在层流火焰中的气体均具有较高的电离度。

一般在碳氢化合物和空气的燃烧火焰中，特别在层流火焰中的气体具有较高的电离度。研究表明，在电场的作用下，火焰会发生弯曲、变长或变短，着火和灭火条件也会发生变化。

3. 自行传播特征 实际中，火焰一旦产生，就不断地向周围传播，直到整个反应系统终止。按火焰自行传播这个特点来讲，火焰可分为两类：①正常火焰（缓燃火焰）：通过导热使未燃混合物温度升高而引起反应加速，从而使火焰向前传播，传播速度既稳定又缓慢，一般为 $0.2\sim 1\text{ m/s}$ 。②爆震火焰：依靠激波的压缩作用，使未燃混合物温度升高而引起剧烈化学反应，从而使火焰向前传播，其传播速度极快，达到超音速，每秒数千米。

4. 辐射特性 火焰辐射来源于三个方面：①热辐射。热辐射来自于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，这类辐射的波长为 $0.7\sim 100\ \mu\text{m}$ ， H_2O 和 CO_2 气体的辐射波长为 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ ，是最强的红外光谱带。这个光谱带在可见光（ $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ）范围之外，所以肉眼无法看到。燃烧产物只有 H_2O 或 CO_2 时火焰无光，称为不发光火焰（含灰分少的气体燃料接近）。②化学发光辐射。化学发光辐射是一种由化学反应而产生的光辐射，这种发光是由于不连续辐射光谱带发射的结果，它来自于电子激发态的各种组分，例如 CH 、 OH 等自由基，这些自由基存在于火焰区中，它是在化学反应瞬间产生的。③炽热固态灰粒和碳粒辐射。固体灰粒和碳粒由于具有连续的辐射光谱，包含了可见光波段，因此具有发光作用，由此而形成的火焰被称为发光火焰，如柴油机中所形成的火焰。与热辐射形成的不发光火焰相比，发光火焰悬浮有大量的炽热碳粒并具有连续的光谱，使辐射能力大大增强。一般地说，燃料燃烧的火焰辐射主要来自于 CO_2 、 H_2O 、碳粒和灰粒，发生辐射的主要是碳粒。

（二）火焰分类

按燃料与氧化剂在进入反应区前有无接触划分，火焰可分为预混火焰（已接触）和扩散火焰（无接触）；按火焰形状划分，火焰可分为移动火焰（火焰位置在空间是移动的）和驻定火焰（火焰位置在空间是固定的）；按流体力学特性划分，火焰可分为层流火焰和湍流火焰，工业上燃烧所产生的火焰多数为湍流火焰；按两种反应物初始物理状态划分，可分为均相反应（如气—气）和多相（异相）反应（如液—气、固—气）。

第三节 燃烧学的主要内容和研究方法

一、燃烧学的主要内容

燃烧学是一门介绍燃烧过程的基础课程。它不仅对气体、液体及固体燃料的着火与熄火机理、火焰传播与稳定机理、化学动力学等进行了详细的理论分析，还对其相关燃烧装置的工作基本原理和过程等进行了实例阐述。学习燃烧学，有利于帮助读者掌握燃烧基本理论，培养读者分析燃烧现象与解决燃烧问题的能力，并对燃烧装置及部件的设计有一个初步的认识。

一般而言，燃烧学主要由燃烧理论和燃烧技术两部分组成。不同学科领域对燃烧学要求的侧重点不同。就本书而言，燃烧理论着重研究燃烧过程中所包括的基本现象，如燃烧反应机理、预混可燃气体的着火与熄灭、火焰的传播机理、火焰的结构、单一油滴燃烧、碳粒燃烧等，并通过运用化学、传热传质学、流体力学等有关理论

对各种燃烧基本现象的物理化学本质进行了详细的阐述。此外，各类燃料的燃烧速度、燃烧稳定性、火焰的流畅和结构、火焰辐射、燃烧污染物生成机理以及燃烧过程数学模型的建立等，都是本书研究的重要内容。

燃烧技术部分主要把燃烧理论中所阐明的物理概念和基本规律与实际工程中的燃烧问题联系起来，对现有的燃烧方法进行分析和改进，对新的燃烧方法进行探讨和试验，以求不断地提高燃料利用率和燃烧设备的技术水平。考虑到我国以煤炭为主要燃料资源的具体国情，本书在全面介绍不同物态燃料燃烧的基础上，重点突出煤炭的燃烧理论和技术。同时，结合我国当前大力发展低碳经济的需要，对国内外研究比较热门的生物质能源的相关燃烧理论和技术，进行了详细的介绍和探讨。

二、燃烧学的研究方法

尽管目前大型电子计算机的出现为通过理论预示实际问题提供了可能，但是，在世界范围内，对于生产中提出的燃烧技术问题主要还是通过数学分析和模型实验来研究解决。目前燃烧理论的作用主要是为各种燃烧过程的基本现象建立和提供一般性的物理概念，从物理本质上对各种影响因素做出定性的分析，从而为实验研究和数据处理指出合理的方向。因此，运用正确的物理概念，通过实验取得定量的关系和结论，仍然是当前解决燃烧技术问题的主要手段。

在燃烧领域，先提出假设随后再用实验求证的情况是少见的，大多数进展都是在有关科学理论不十分清楚的情况下取得的，对于火焰的特性几乎完全是靠实验测量建立的。

目前世界上燃烧研究的重点在于以下两个方面。

1. 燃烧应用研究方面 ①低质燃料 (low grade fuels) 燃烧技术，特别是洁净煤燃烧技术；②低污染燃烧过程控制技术；③代用燃料 (CWM、COM) 燃烧技术；④柴油机燃烧技术；⑤与安全有关的燃烧问题。

2. 燃烧基础研究方面 ①紊流与化学动力学的相互作用；②燃烧非接触式测量技术 (如激光)；③实用燃烧室的计算机模型；④液滴与颗粒群的燃烧；⑤炭烟形成机理；⑥火焰结构、火焰传播与熄火；⑦固相燃烧机理。

在基础研究中又以固相燃烧机理研究最重要，其主要服务对象是煤的洁净化高效利用，它由美国燃烧科学家 Smoot (犹他州杨伯翰大学教授)、Glassman (明尼苏达大学教授)，中国科学院工程热物理研究所燃烧科学家吴承康研究员等人在第 21 届国际燃烧学学术会议上提出。

三、燃烧学的应用

燃烧是人们利用燃料获得能源的最有效途径之一。人类的发展和进步离不开能源，无论是在工业生产、动力工程，还是在日常生活、防火防爆等方面都广泛存在着燃烧现象。在动力工程中，如火力发电厂、汽车、飞机、船舶、火箭等工程，燃料燃烧是其主要的动力来源，而且在这些动力设备的设计、制造与使用过程中，都涉及有关燃烧科学知识的运用。同样，在工业生产中，如炼钢，炼铁，炼油，砖瓦、陶瓷和水泥的烧制等生产中，燃料的燃烧也起着关键性的作用。在人类的生活中，目前人类做饭、取暖所使用的热源，绝大多数都是靠燃烧来提供的，而且炉具的研制以及锅炉的设计、安装与使用都离不开燃烧学知识的应