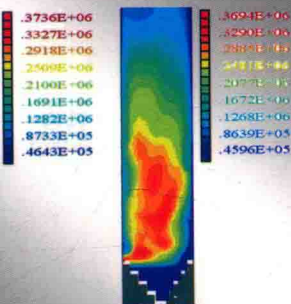


普通高等教育“十三五”规划教材

# 燃烧学

第2版

徐通模 惠世恩 主编



双色印刷  
二维码



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高

教材

# 燃 烧 学

第 2 版

主 编 徐通模 惠世恩  
参 编 周屈兰 谭厚章 阎维平 汪 军  
主 审 许晋源

机械工业出版社

本书共三篇，从内容编排上分三篇八章展开。第一篇为学习燃烧学必须掌握的燃烧化学反应动力学和以动量、热量、质量传递为核心的燃烧空气动力学，这是燃烧学的理论基础；第二篇为燃烧科学内在的基本原理和规律，着重介绍燃料着火理论，气、油、煤燃烧的过程和特点；第三篇为启迪读者深入思考的几个热门科技命题：燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的生成和控制、催化燃烧、化学链燃烧、富氧燃烧，燃烧数值模拟及燃烧实验的相似原理和模化方法等。全书各章都附有思考题和习题，有些扫描二维码可查看参考答案和提示，以帮助读者理解和掌握书中的核心内容。

本书可作为高等学校能源与动力工程专业本科生教材，也可作为燃烧科技领域的研究生和工程技术人员以及广大燃烧科学爱好者有益的参考书。

本书配有电子课件，向授课教师免费提供，需要者可登录机工教育服务网 ([www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)) 下载。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

燃烧学/徐通模, 惠世恩主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-55429-5

I. ①燃… II. ①徐… ②惠… 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 (2016) 第 278290 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 蔡开颖 责任编辑: 蔡开颖 张丹丹 任正一

责任校对: 肖琳 封面设计: 张静

责任印制: 李飞

北京振兴源印务有限公司印刷

2017 年 4 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.25 印张·518 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-55429-5

定价: 48.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

## 第 2 版 前 言

本书为能源与动力工程专业专业基础课用书。本次修订保留了第 1 版的基本指导思想和相对成熟的知识基本框架结构,由“燃烧科学基础”“燃烧科学技术基本原理”“燃烧科学技术新发展”三篇组成。主要修订内容有:

1. 更新了书中一些技术法规数据,统一了常用物理量的表示符号等,便于读者阅读其他参考书时内容对接。

2. 适当调整了部分内容的布置和相互衔接,表述上力求顺畅和易读。同时删去了部分重复内容。

3. 增加了第一章“绪论”和第八章的第五节“富氧燃烧”和第六节“化学链燃烧”两节。简明、概括地介绍了常见的工程燃烧设备概貌和工作特点;从环境保护角度,介绍了当前国内外比较关注的新型燃烧技术的基本工作过程及研究现状,力图启发初学者对燃烧科技的想象力,激发他们拓展知识面、探索未来的激情。

4. 本书有些章后的思考题和习题附有参考答案和提示,第八章有部分彩图等资源,均可通过扫描二维码查看。

以上修订来自作者多年教学实践的一些感悟,也是一次新的探索和尝试。恳请使用本书的高校师生和读者给予关注和批评指正。

本书第一章、第四章的第一至四节和第六节、第八章的作者为西安交通大学教授周屈兰。第二章的作者为华北电力大学教授阎维平。第三章的作者为西安交通大学教授徐通模。第四章的第五节和第五章的作者为原上海理工大学教授汪军。第六章的作者为西安交通大学教授谭厚章。第七章的作者为西安交通大学教授惠世恩。全书特请西安交通大学燃烧学专家许晋源教授审阅。

本书全体作者向本书参考文献的作者们及所有关心、支持和帮助本书出版的朋友们表示真诚的谢意。

编 者



## 第 1 版 前 言

本书是在西安交通大学许晋源、徐通模合编的《燃烧学》1980年初版和1990年修订版的基础上，根据近年来燃烧科学技术的发展和人们对燃烧科学知识的需求，并充分考虑到多年来燃烧学课程教学实践的经验体会和热能工程专业大学生学习的感受，重新组织编写的全新《燃烧学》教材。本书的编写和内容安排有如下思考和探索：

1. 本书的编者，除西安交通大学能源与动力工程学院热能工程系多年从事燃烧科学技术教学、科研和新技术开发的教师外，还特别组织了华北电力大学和上海理工大学的燃烧专家参加合作编写。其目的是进一步凝聚各个类型的、有特色的高校在燃烧科学方面教学、科研的成果及教学实践的成功经验，使本书的内容更加充实，视野更加宽阔，可读性更强，同时更能充分地反映相关学科读者的需求。

2. 本书在内容组织和编排上，既充分考虑到燃烧科学的内在规律性和知识的交互性，又充分考虑到有利于读者对燃烧科学基本内容的学习、了解和掌握。坚持循序渐进、启迪思维、引人入胜、提高可读性的基本原则。本书分三篇，共七章。第一篇为“燃烧基础”，重点讲解了燃烧化学反应动力学和动量、热量、质量传递（即“三传”）的燃烧空气动力学基础知识；第二篇为“燃烧原理”，分别对着火理论和气、液、煤三类燃料的燃烧特点、基本规律及解决工程问题的科学方法进行了比较全面、完整、实际的描述和介绍；第三篇为“燃烧科学技术的新发展”，重点对当今燃烧科学技术发展中的四个科学问题，即 $\text{NO}_x$ 的燃烧控制、催化燃烧、燃烧模化实验方法和燃烧数值模拟等进行了最基础性的阐述和介绍，以扩大读者的视野，启发读者的探索精神，唤起读者研究上述科学问题和相关燃烧新科学问题的兴趣以及下决心攻克科学难题的激情。

本书由西安交通大学徐通模任主编、惠世恩任副主编。第一章由华北电力大学阎维平教授编写，第二章由徐通模教授编写，第三章和第七章由西安交通大学周屈兰教授编写，第四章由上海理工大学汪军教授编写，第五章由西安交通大学谭厚章教授编写，第六章由惠世恩教授编写。全书特请西安交通大学燃烧学专家许晋源教授审阅，使编者深受教益，在此表示诚挚的谢意。

编者还要特别向本书参考文献的所有作者，向支持、关心本书出版的西安交通大学能源与动力工程学院院长助理李军副教授，向广大读者及所有给予帮助的朋友们表示深深的敬意。

由于编者知识、能力、阅历的局限性，恳请各位同行、同事和朋友们以及广大读者提出宝贵意见和建议。

编 者

# 目录

第2版前言

第1版前言

## 第一篇 燃烧科学基础

第一章 绪论	2	速率的影响	21
第一节 燃烧概述	2	五、催化作用对化学反应速率的影响	22
第二节 常见的燃烧设备	3	第四节 链式化学反应	23
一、煤粉炉	3	一、链式反应的特点	23
二、链条炉	3	二、不分支链式反应	24
三、内燃机	4	三、分支链式反应	26
四、燃气轮机	4	四、分支链式反应的孕育与爆炸特点	30
五、火箭发动机	5	第五节 燃烧化学反应中的化学平衡	31
第三节 常见的燃料	6	思考题和习题	32
思考题和习题	6	参考文献	33
参考文献	7	第三章 燃烧空气动力学基础——混合 与传质	34
第二章 燃烧化学反应动力学基础	8	第一节 湍流的物理本质和数学描写	34
第一节 燃烧化学反应动力学概述	8	一、湍流脉动	34
第二节 燃烧化学反应速率	9	二、湍流的数学描写——雷诺方程组	38
一、浓度	9	三、湍流附加应力的假定	41
二、化学反应速率	10	第二节 动量、热量和质量传递的比拟	45
三、基元反应与总包反应	11	一、分子运动扩散和湍流运动扩散	45
四、质量作用定律	11	二、热量交换和质量交换的比拟	48
五、反应级数	12	第三节 湍流射流中的积分守恒条件	50
六、基元反应的化学反应速率	14	一、湍流自由射流的特性	50
七、总包反应的化学反应速率	15	二、伴随流射流中的积分守恒条件	53
第三节 影响化学反应速率的因素	16	三、自由射流的积分守恒条件	56
一、温度对化学反应速率的影响——阿累 尼乌斯定律	16	四、“三传”过程中普遍适用的二元微分 方程组	56
二、活化能 $E$ 对化学反应速率的影响	19	第四节 湍流自由射流中的混合与传质	57
三、压力对化学反应速率的影响	20	一、湍流自由射流轴心线上参数的变化	
四、反应物浓度和摩尔分数对化学反应			





规律 .....	57	四、旋转射流的一些实验研究结果介绍 .....	75
二、大温差不等温自由射流的湍流混合与传质 .....	63	第六节 钝体射流中的混合与传质 .....	80
三、射流本身因燃烧而不断升温情况下的混合与传质 .....	65	一、钝体射流的流动结构 .....	80
四、气-固(液)两相射流中的混合与传质 .....	68	二、钝体射流的流动特性 .....	81
第五节 旋转射流中的混合与传质 .....	70	第七节 平行与相交射流中的混合与传质 .....	83
一、旋转射流的特性 .....	70	一、混合与传质的动力参数条件 .....	83
二、旋流强度及旋转射流的流动形式 .....	72	二、平行射流 .....	84
三、各种旋流器旋流强度的计算 .....	74	三、相交射流 .....	91
		四、横向射流 .....	96
		思考题和习题 .....	100
		参考文献 .....	102

## 第二篇 燃烧科学技术基本原理

<b>第四章 着火理论</b> .....	104	参考文献 .....	146
第一节 着火的基本概念 .....	104	<b>第五章 气体燃料燃烧</b> .....	147
一、着火过程 .....	104	第一节 扩散火焰与预混火焰 .....	147
二、着火方式与机理 .....	104	一、燃烧方式与火焰结构 .....	147
三、着火条件的数学描述 .....	106	二、气体燃料的预混燃烧 .....	148
第二节 热自燃理论 .....	106	三、气体燃料的扩散燃烧 .....	152
一、热自燃条件 .....	106	第二节 火焰稳定的原理和方法 .....	157
二、热自燃温度 .....	109	一、火焰稳定的基本条件 .....	158
三、热自燃界限 .....	111	二、火焰稳定机理 .....	160
四、热自燃孕育期 .....	114	三、高速气流中火焰的稳定 .....	162
第三节 链锁自燃理论 .....	117	四、火焰稳定的主要方法 .....	165
一、链锁自燃与热自燃 .....	117	第三节 湍流燃烧火焰特点 .....	168
二、链锁自燃条件 .....	118	一、湍流火焰传播的皱折表面燃烧理论 .....	169
三、链锁自燃孕育期 .....	120	二、湍流火焰传播的容积燃烧理论 .....	172
第四节 强迫点燃理论 .....	120	三、湍流扩散燃烧 .....	173
一、强迫点燃与热自燃 .....	120	思考题和习题 .....	175
二、强迫点燃方法 .....	121	参考文献 .....	175
三、炽热物体点燃理论 .....	121	<b>第六章 液体燃料燃烧</b> .....	177
第五节 火焰传播 .....	126	第一节 液体燃料的特性 .....	177
一、火焰传播现象 .....	126	一、油类燃料特性 .....	177
二、正常火焰传播 .....	126	二、其他液体燃料 .....	180
三、正常火焰传播速度的理论求解及分析 .....	129	第二节 液体燃料的雾化 .....	181
四、正常火焰传播速度的主要影响因素 .....	134	一、雾化过程及机理 .....	182
第六节 燃烧热工况 .....	138	二、喷嘴 .....	183
一、零元系统的燃烧热工况 .....	138	三、液体燃料雾化性能 .....	186
二、一元系统的燃烧热工况 .....	143	第三节 液滴的蒸发 .....	188
思考题和习题 .....	145	一、液滴蒸发时的斯蒂芬流 .....	189
		二、相对静止环境中液滴的蒸发 .....	189



三、强迫气流中液滴的蒸发 .....	192	第四节 碳的燃烧化学反应 .....	233
四、液滴群的蒸发 .....	194	一、碳的晶格结构 .....	235
第四节 液滴燃烧 .....	195	二、碳与氧的反应机理 .....	235
一、静止液滴的燃烧 .....	196	三、碳和二氧化碳的反应机理 .....	238
二、强迫气流中液滴的燃烧 .....	199	四、碳与水蒸气的反应 .....	238
三、液滴群的燃烧 .....	202	五、表面反应的碳球燃烧速率 .....	239
四、合理配风 .....	203	六、二次反应对碳燃烧过程的影响 .....	241
思考题和习题 .....	205	七、具有空间二次反应的碳球燃烧速率 .....	245
参考文献 .....	206	第五节 多孔性碳球的燃烧 .....	252
<b>第七章 煤的燃烧</b> .....	207	第六节 灰分对焦炭燃烧的影响 .....	256
第一节 煤的燃烧过程、特点及其热解 .....	207	一、碳粒燃烧过程的物理模型 .....	256
一、煤的燃烧过程 .....	207	二、不同燃烧温度下灰分对燃烧的影响 .....	258
二、水分的蒸发过程及对燃烧的影响 .....	208	三、灰分对焦炭燃烧的其他影响 .....	260
三、煤的热解与挥发分的燃烧 .....	209	第七节 煤粉燃烧 .....	260
四、煤粒的着火 .....	216	一、煤粉气流的输送与分配 .....	260
五、煤粒燃烧的一些实验研究结果 .....	219	二、煤粉气流的着火 .....	266
六、影响煤粒着火的因素 .....	220	三、旋转射流中煤粉的着火 .....	272
七、焦炭的燃烧特性 .....	221	四、直流射流中煤粉的着火 .....	276
第二节 碳燃烧化学反应的过程 .....	222	五、煤粉气流的燃尽过程 .....	277
一、碳燃烧化学反应的步骤 .....	222	思考题和习题 .....	280
二、碳燃烧过程中的吸附和解吸 .....	223	参考文献 .....	281
三、碳燃烧过程中的扩散 .....	226		
第三节 碳的动力燃烧与扩散燃烧 .....	229		
<b>第三篇 燃烧科学技术新发展</b>			
<b>第八章 燃烧科学技术发展中的几个科学问题</b> .....	284	第四节 燃烧过程数值模拟 .....	312
第一节 氮氧化物的生成机理及燃烧控制 .....	284	一、基本原理、算法与程序特点 .....	313
一、概述 .....	284	二、数值模拟的结果 .....	317
二、煤燃烧过程中 $\text{NO}_x$ 的生成机理 .....	285	第五节 富氧燃烧 .....	322
三、煤燃烧过程中 $\text{NO}_x$ 的破坏机理 .....	289	一、煤粉在富氧燃烧条件下的着火和燃烧特性 .....	323
四、影响煤粉炉内 $\text{NO}_x$ 生成的因素 .....	291	二、富氧燃烧污染物释放和控制 .....	323
第二节 催化燃烧 .....	294	三、富氧燃烧方式下矿物质转化及灰熔融特征 .....	324
一、催化燃烧控制 $\text{NO}_x$ 和 CO 生成的原理 .....	294	四、经济性评价 .....	324
二、典型催化燃烧室 .....	294	第六节 化学链燃烧 .....	325
三、催化燃烧催化剂的研究进展 .....	297	一、氧载体 .....	326
第三节 燃烧过程的相似与模化 .....	302	二、化学链燃烧反应器 .....	326
一、相似理论在燃烧过程中的应用 .....	302	三、化学链燃烧系统与其他系统耦合 .....	327
二、燃烧空气动力过程的物理模化 .....	311	思考题和习题 .....	328
		参考文献 .....	329



# 第一篇

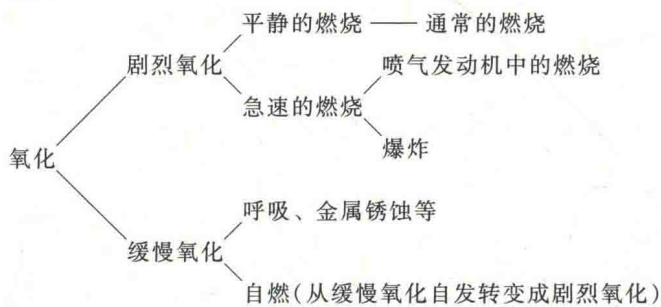
## 燃烧科学基础

# 第一章

## 绪论

### 第一节 燃烧概述

燃烧是燃料与氧气发生剧烈化学反应并伴随着发光发热的现象。通过燃烧反应可以将燃料的化学能转化为热能。诸如锅炉、内燃机、燃气轮机等能量转换设备，均是以燃烧的形式实现化学能向热能，进而向机械能转换。氧化反应是燃烧现象的基本过程。氧化反应及燃烧现象的分类如下图所示。



燃烧的应用有着悠久的历史。远古时代，火的使用使人类从野蛮状态走向文明，燃烧可以说是人类社会进步重要的推动力量。人类使用火的历史虽然很久远，但是，对燃烧的认识却经历了漫长的过程。

10世纪以前，人们认为燃烧取决于一种特殊的物质“燃素”。1703年，奥尔格·恩斯特·斯塔耳提出，能燃烧的物质都含有燃素，当物质燃烧时燃素就分离出来，燃烧时产生的热、光、火焰都是燃素逸出时的剧烈现象。燃素论部分地解释了燃烧的现象，但是，“燃素”学说最终被证明不能完全解释清楚各种燃烧现象。

18世纪中叶，法国化学家拉瓦锡和俄国科学家罗蒙诺索夫根据他们的实验，分别提出燃烧是物质氧化的理论。1773年10月，英国化学家普里斯特里向拉瓦锡介绍了自己的实验：氧化汞加热时，可得到脱燃素气，这种气体使蜡烛燃烧得更明亮，还能帮助呼吸。拉瓦锡重复了普里斯特里的实验，得到了相同的结果。拉瓦锡认为这种气体是一种元素，1777年正式把这种气体命名为Oxygen（中译名氧）。拉瓦锡还通过精确的定量实验，证明物质虽





然在一系列化学反应中改变了状态，但参与反应的物质的总量在反应前后是相同的。于是拉瓦锡用实验证明了化学反应中的质量守恒定律。拉瓦锡的氧化学说彻底地推翻了燃素说，使化学开始蓬勃地发展起来。

19世纪，热化学和热力学研究方法蓬勃发展，发现了燃烧热、绝热燃烧温度和燃烧产物平衡成分等重要特性，有力地推动了燃烧科学的发展。

20世纪初，苏联化学家谢苗诺夫和美国化学家刘易斯等人发现，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，苏联科学家捷里多维奇、弗兰克·卡梅涅茨基和美国的刘易斯等人又进一步发现，燃烧现象，无论是着火、熄灭和火焰传播，还是缓燃和爆燃等，都是化学反应动力学和传热传质等物理因素的相互作用。人们认识到，燃烧过程的主导因素往往不仅仅是化学反应动力学，还有流动和传热传质因素，初步形成了现代的燃烧理论。

20世纪40~50年代，航空、航天技术迅猛发展，使燃烧的研究由一般动力机械扩展到喷气发动机、火箭发动机等领域，并取得了迅速的发展。因此，美籍犹太裔力学家冯·卡门和中国的钱学森建议用连续介质力学方法来研究燃烧，提出了“化学流体力学”这一名称。此后，许多科学家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，由于高速电子计算机的出现，英国科学家斯波尔丁等人提出了一系列流动、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科学有机地结合起来，形成了“计算燃烧学”，开辟了研究燃烧理论及其应用的新途径。而70年代中期以来，应用激光技术测量燃烧过程中气体和颗粒的速度、温度和浓度等，加深了对燃烧现象的认识。

燃烧学的进一步发展将与湍流理论、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。燃烧学是一门正在发展中的学科。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，仍需进行大量的深入研究工作，所以燃烧学具有广阔的发展前景。

## 第二节 常见的燃烧设备

### 一、煤粉炉

煤粉炉是指以煤粉为燃料的悬浮燃烧炉，典型的煤粉炉系统如图1-1所示。它的炉膛是用水冷壁炉墙围成的大空间，磨碎的煤粉（颗粒直径约为0.05~0.1mm）和空气经燃烧器混合后，喷入炉膛燃烧。煤粉的燃烧分着火前的准备阶段、燃烧阶段和燃尽阶段。与此相对应，炉膛也可以分为三个区域：燃烧器出口附近为着火区，出口的上方为燃烧区，燃烧区上部一直到炉膛出口为燃尽区。煤粉炉适用的煤种多，是现代燃煤锅炉的主要形式，特别适合于发电厂的大型锅炉，容量较大（ $D \geq 35t/h$ ）的工业锅炉也常常采用。煤粉炉需要配备磨煤设备和相应的除尘装置，燃烧工况的组织比较复杂，影响燃烧稳定性的因素较多。

### 二、链条炉

链条炉是机械化程度较高的一种层燃炉，因其炉排类似于链条式履带而得名（图1-2）。





链条炉是工业锅炉中使用较广泛的一种炉型。在 10~65t/h 中等容量，甚至 1~2t/h 的小容量锅炉中都有采用。煤的燃烧过程是在移动中完成的，它的燃烧工况稳定，热效率较高，运行操作方便，劳动强度低，烟尘排放浓度较低。它属于单面着火方式，运行时燃料无自身扰动，沿炉排长度方向燃料层有明显的分区。为使燃料中的可燃物和飞灰可燃物燃尽，可以采用“二次风”。由于着火条件不好，拨火又必须人工操作，因此它不适于燃烧水分很大、灰分又多、结焦性强的煤。它的另一个缺点是金属耗量大。

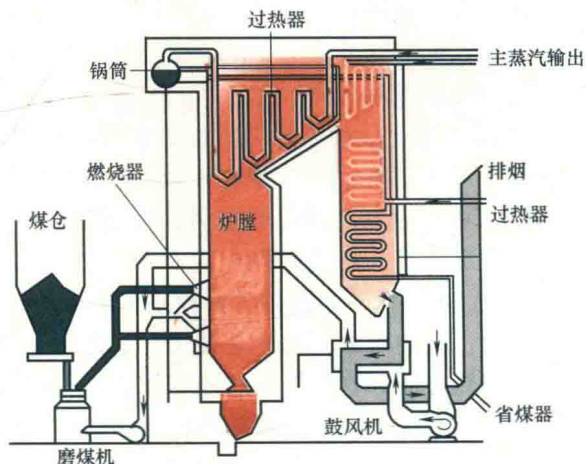


图 1-1 电站煤粉炉系统

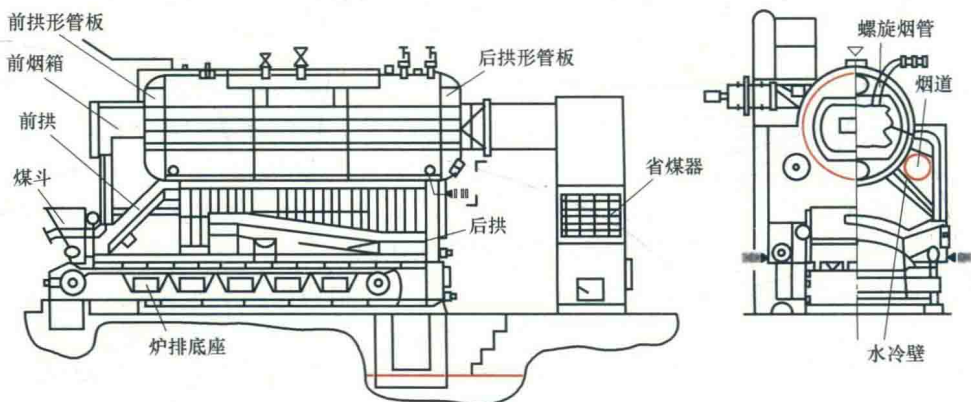


图 1-2 链条炉系统

### 三、内燃机

内燃机是一种动力机械，它是使燃料在机器内部燃烧，并将其放出的热能直接转换为动力的热力发动机。广义上的内燃机不仅包括往复式内燃机、旋转活塞式发动机和自由活塞式发动机，也包括旋转叶轮式的喷气式发动机，但通常所说的内燃机是指活塞式内燃机。

活塞式内燃机以往复式最为常见，如图 1-3 所示。活塞式内燃机将燃料和空气混合，在其气缸内燃烧，释放出的热能使气缸内产生高温高压的燃气。燃气膨胀推动活塞做功，再通过曲柄连杆机构或其他机构将机械功输出，驱动从动机械工作。常见的内燃机有柴油机和汽油机。

### 四、燃气轮机

燃气轮机 (Gas Turbine) 是一种以连续流动的气体作为工质、把热能转换为机械功的旋转式动力机械，燃气轮机结构如图 1-4 所示。在空气和燃气的主要流程中，只有压气机 (Compressor)、燃烧器 (Combustor) 和燃气透平 (Turbine) 这三大部件组成的燃气轮机循

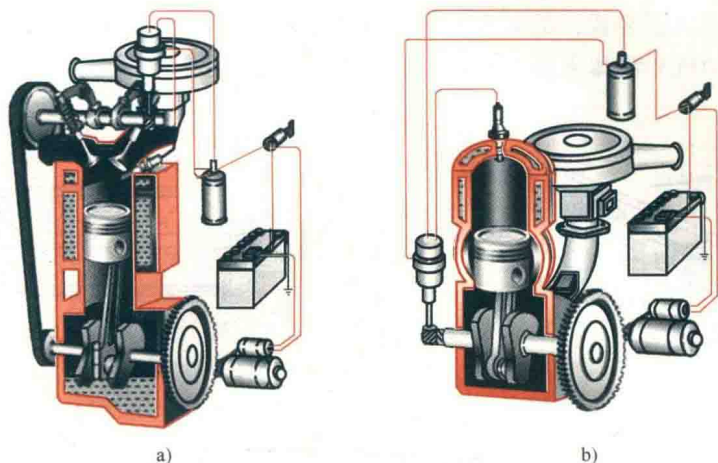


图 1-3 内燃机结构

a) 四行程 b) 二行程

环，通称为简单循环。大多数燃气轮机均采用简单循环方案。因为它的结构最简单，而且最能体现出燃气轮机所特有的体积小、重量轻、起动快、少用或不用冷却水等一系列优点。

外界大气环境的空气被压气机吸入，并经过轴流式压气机逐级压缩使之增压，同时空气温度也相应提高；压缩空气被压送到燃烧器，与喷入的燃料混合燃烧，生成高温高压的燃气，然后再进入到透平中膨胀做功，推动透平带动压气机和外负荷转子一起高速旋转，实现了气体或液体燃料的化学能部分转化为机械功。从透平中排出的废气排至大气自然放热，这样，燃气轮机就把燃料的化学能转化为热能，又把部分热能转变成机械能。通常在燃气轮机中，压气机是由燃气透平膨胀做功来带动的，它是透平的负载。在简单循环中，透平发出的机械功有  $1/2 \sim 2/3$  用来带动压气机，其余  $1/3 \sim 1/2$  的机械功用来驱动发电机。在燃气轮机起动的时候，首先需要外界动力，一般是起动机带动压气机，直到燃气透平发出的机械功大于压气机消耗的机械功时，外界起动机脱扣，燃气轮机才能自身独立工作。

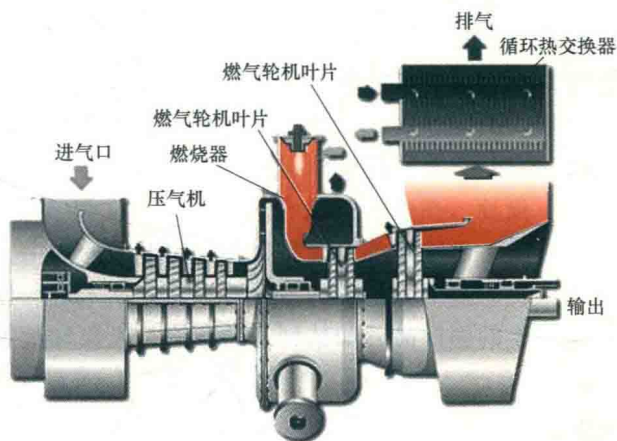


图 1-4 燃气轮机结构

## 五、火箭发动机

火箭发动机就是利用冲量原理，自带推进剂，不依赖外界空气的喷气发动机。同空气喷气发动机相比较，火箭发动机的最大特点是：它自身既带燃料，又带氧化剂，靠氧化剂来助燃，不需要从周围的大气层中汲取氧气。所以它不但能在大气层内，也可在大气层之外的宇宙真空中工作。这是任何空气喷气发动机都做不到的。发射的人造卫星、月球飞船以及各种





宇宙飞行器所用的推进装置，都是火箭发动机。根据燃料的品种不同，常见的火箭发动机又分为固体火箭发动机和液体火箭发动机，如图 1-5 所示。

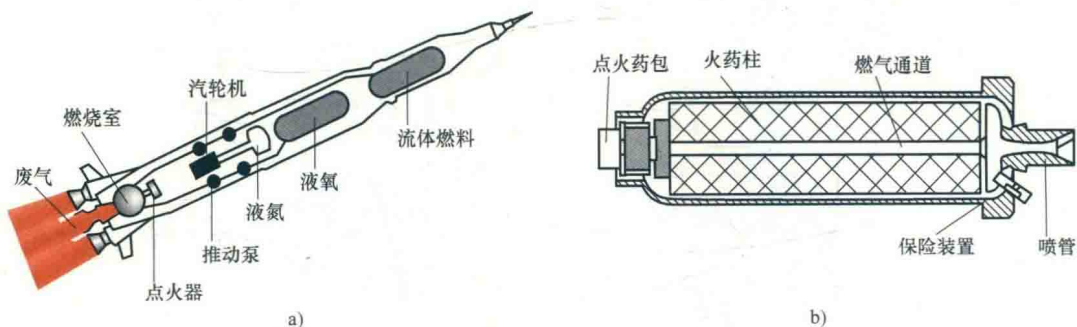


图 1-5 火箭发动机结构

a) 液体火箭发动机 b) 固体火箭发动机

### 第三节 常见的燃料

常见的燃料有气、液、固三种形态，见表 1-1。自然界存在的气体燃料主要是天然气、煤层气和页岩气，而人工制造的气体燃料主要有高炉煤气、发生炉煤气、焦炉煤气、液化石油气等。自然界存在的液体燃料主要是石油，而人工制造的液体燃料主要是石油提炼物，包括汽油、煤油、柴油、重油等。近些年，从煤或者生物质中制取的替代液体燃料甲醇、乙醇、二甲醚、水煤浆等也开始得到一定范围的使用。自然界存在的固体燃料主要是煤和生物质，而人工制造的固体燃料品种繁多，包括木炭、焦炭、泥煤砖、煤矸石等，而人类的工农业活动产生的副产品，如秸秆、甘蔗渣、可燃垃圾等，也可归入固体燃料的范围。

表 1-1 常见的燃料

类别	天然燃料	人工燃料
气体燃料	天然气、煤层气、页岩气	高炉煤气、发生炉煤气、焦炉煤气、液化石油气
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、甲醇、乙醇、二甲醚、水煤浆
固体燃料	木柴、泥煤、烟煤、无烟煤、石煤、油页岩等(可燃冰)	木炭、焦炭、泥煤砖、煤矸石、秸秆、甘蔗渣、可燃垃圾等

以上只是燃料品种一种大致的划分。实际上，即使是同属于气体燃料的甲烷和氢气燃烧，其规律都有很大的差异。虽然燃烧过程的核心是化学反应，但燃烧学不等同于化学，燃烧过程与流动、传热、传质密切相关，涉及大量物质和能量的转化、传递过程。学习《燃烧学》需要具备融汇多个学科知识的能力。《燃烧学》同时还是一门实践性极强的学科，需要较好的形象思维能力和动手能力。

### 思考题和习题

1-1 请简述电站锅炉发电过程中，从燃料（煤）开始，到终端用电器（例如电灯）的过程中，能量转化和损耗的过程。





- 1-2 描述家用天然气灶中，能源转化的源头和中间转化过程。
- 1-3 试讨论化石能源的勘探、开采和应用前景。
- 1-4 试讨论发电和驱动汽车这两种供能技术的发展前景。

### 参 考 文 献

- [1] 许晋源, 徐通模. 燃烧学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [2] 常弘哲, 张永廉, 沈际群. 燃料与燃烧 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1993.
- [3] 徐通模, 金定安, 温龙. 锅炉燃烧设备 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [4] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [5] 陈立勋, 等. 锅炉本体布置及计算 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [6] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] 姚秀平. 燃气轮机与联合循环 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [8] 萨顿 G P, 比布拉兹 O. 火箭发动机基础 [M]. 洪鑫, 张宝炯, 等译. 北京: 科学出版社, 2003.

## 第二章

# 燃烧化学反应动力学基础

### 第一节 燃烧化学反应动力学概述

化学反应是燃烧现象的基本过程，分为单相燃烧化学反应与异相燃烧化学反应。

从理论上研究燃烧化学反应过程主要用化学反应动力学法。有时假设燃烧组分近似处于可逆反应的平衡状态，这在许多条件下并不成立，但可指明化学反应的方向，也隐含着化学反应速率。

化学反应动力学研究化学反应机理与化学反应速率，涉及基元反应、链式反应、总包反应及异相反应中有固体参与的表面反应等，分子碰撞理论与链式反应理论是化学反应动力学的基础。

燃料在动力燃烧装置中的停留时间一般不超过 2s，譬如燃煤粉的大型电站锅炉；最短时间仅为数毫秒，譬如燃气轮机；也有长达数分钟，譬如燃煤循环流化床锅炉。燃料在动力燃烧装置中的压力从常压至数个兆帕不等，还有在诸如微尺度、微重力等极端物理条件下的燃烧。在各种条件下，不仅要在燃烧室内完成燃烧反应、释放热量，还要抑制与燃烧有关的污染物的产生。污染物也发生各种化学反应，这也是本学科的研究对象。

在相当一部分燃烧过程中，化学反应速率对燃烧过程起着控制作用，譬如，着火、熄火及火焰传播等过程与化学反应动力学过程密切相关，并且，化学反应动力学过程决定了所有燃烧过程中污染物的生成与破坏。因此，在分析实际燃烧问题、抑制污染物生成、燃烧过程数值模拟以及设计各种动力燃烧装置中，均需要详细了解各种燃烧化学反应动力学机理以及影响燃烧反应速率的规律。得益于近 20 年来化学各领域的研究成果，在探明反应物到反应产物的化学反应途径、基元化学反应、揭示 NO 等的生成机理及测定反应速率等方面，积累了大量实验与分析数据，丰富了燃烧化学反应动力学的内容。

化学反应动力学的研究对象是理想掺混、温度均匀的化学反应系统，而绝大多数实际燃烧过程为湍流燃烧，流动、传热与传质效应将发挥作用，因此，解决实际燃烧问题要依赖于燃烧化学动力学与湍流流体力学的紧密耦合，前者为一阶常微分方程描述的反应动力学方程，而后者为二阶偏微分方程组描述的湍流流体力学方程。目前，采用基于计算流体力学



的计算机数值求解方法，联立并求解反应动力学方程与质量、动量及能量平衡方程组，虽然已经能够为解决许多实际燃烧问题提供有价值的参考，但还大大依赖于完善的燃烧模型、详细可靠的数据及燃烧化学反应动力学的发展。

## 第二节 燃烧化学反应速率

在燃烧化学反应进行过程中，燃料、氧气与燃烧产物的浓度或质量都是不断变化的，反应进行得越快，单位体积、单位时间内燃料与氧气消耗的量越多，产生的燃烧产物也越多，因此，采用化学反应速率来描述燃烧化学反应进行的快慢。

### 一、浓度

化学反应速率的描述首先与参与反应的物质的浓度有关。一般情况下，参加反应的气态物质均采用物质的浓度来表示。物质的浓度是以单位体积内所含的物质的量来确定的，物质的量用质量、物质的量表示，对应的物质的浓度就有质量浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、物质的量浓度 ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )，不同浓度之间可以进行换算。用质量、物质的量的相对值来表示某物质在混合物中的含量时，则相应有关质量分数 (%)、摩尔分数 (%)。

#### 1. 质量浓度

质量浓度是指单位体积的混合物中某一组分 A 的质量，可以表示为

$$\rho_A = \frac{m_A}{V} \quad (2-1)$$

式中， $\rho_A$  是 A 组分的质量浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $m_A$  是 A 组分的质量 (kg)； $V$  是混合物的体积 ( $\text{m}^3$ )。

#### 2. 物质的量浓度

物质的量浓度简称浓度，可以表示为

$$c_A = \frac{n_A}{V} \quad (2-2)$$

式中， $c_A$  是 A 组分的物质的量浓度 ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )； $n_A$  是 A 组分的物质的量 (mol)； $V$  是混合物的体积 ( $\text{m}^3$ )。

在混合气体中，某组成气体的状态方程式为

$$p_A V = n_A R T \quad (2-3)$$

式中， $R$  是摩尔气体常数， $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

引入物质的量浓度的定义，可得

$$c_A = \frac{n_A}{V} = \frac{p_A}{RT} \quad (2-4)$$

式 (2-4) 表明气体的物质的量浓度与其分压力成正比。

#### 3. 摩尔分数

摩尔分数为某物质的物质的量与同一容积内混合物的物质的量的比值，即

$$x_A = \frac{n_A}{n_A + n_B + \dots} \quad (2-5)$$