



燃烧学

COMBUSTION

主 编 隆武强
编 著 郭晓平 田江平

 科学出版社

燃 烧 学

隆武强 主编

郭晓平 田江平 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了燃烧学的基础理论及应用,内容涉及燃烧动力学、燃烧物理学、预混合及扩散燃烧、液体燃料燃烧、有害物生成及控制以及内燃机预混合压燃等。

本书可作为动力机械及工程、工程热物理、流体机械及工程、热能工程、化工机械等学科本科生学习专业课程的先导课程教材,或动力机械与工程热物理学科研究生以及相关专业科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧学/隆武强主编;郭晓平,田江平编著.—北京:科学出版社,2015.1
ISBN 978-7-03-042253-8

I. ①燃… II. ①隆… ②郭… ③田… 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(2014)第244858号

责任编辑:田 雪 张 震/责任校对:刘亚琦

责任印制:徐晓晨/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京康华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:17 3/8

字数:350 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

燃烧学是由热力学、化学动力学、流体力学、传热学和数学有机组成的一门交叉学科。因此在学习本课程之前，需要学生具备一定的热力学、流体力学和传热学基础知识。

本书分为两篇，共 11 章。两篇分别为基础篇和应用篇。基础篇为第 1 章至第 8 章，应用篇为第 9 章至第 11 章。在基础篇中：第 1 章介绍燃烧学的常用术语和基本概念以及目前燃烧学的典型研究方法；第 2 章为燃烧化学动力学，介绍分子热活化理论和链反应理论；第 3 章为燃烧化学热力学，以热力学两大定律为基础分析燃烧过程中的能量守恒、化学反应的方向和进行的程度；第 4 章为燃烧物理学，介绍燃烧过程中的物理量守恒问题；第 5 章为反应机理，为从第 2 章中划分出的内容；第 6 章介绍着火与熄火这两个瞬态过程；第 7 章介绍预混合气体的燃烧；第 8 章介绍射流扩散燃烧。应用篇中：第 9 章介绍液体燃料的雾化和燃烧；第 10 章介绍燃烧有害物的生成及控制；第 11 章为内燃机预混合压燃，介绍了目前在内燃机燃烧领域预混合压燃研究方向最新科研成果，以及预混合压燃实用化的途径，以拓宽读者的视野。

本书是结合作者的部分相关研究成果，参考多部经典燃烧学方面的教程，在多年燃烧学课程教学经验的基础上编著的。由于编者水平有限，本书在内容取舍、编排以及未经大量实验验证的最新科研成果方面可能存在纰漏，恳请读者在使用过程中对本版《燃烧学》提出批评和指正，以便后续改进，在此致以诚挚的谢意。

编著者

2014 年 9 月

目 录

基础篇

第 1 章 绪论	3
1.1 基本概念	3
1.2 燃烧学的特点和研究方法	11
第 2 章 燃烧化学动力学	14
2.1 化学反应速率	14
2.1.1 基元反应与总包反应	14
2.1.2 反应速率方程	15
2.1.3 反应速率常数	19
2.1.4 平衡常数	20
2.1.5 反应级数和反应分子数	21
2.1.6 第三体的概念	23
2.1.7 稳态近似理论	24
2.1.8 与压力有关的基元反应的反应级数	25
2.2 影响化学反应速率的因素	26
2.3 链反应	32
第 3 章 燃烧化学热力学	38
3.1 燃烧热力学系统	38
3.1.1 状态参数	38
3.1.2 气体的内能	41

3.2	热力学第一定律的能量方程式	42
3.3	物质的绝对焓和生成焓	44
3.4	气体的比热容	45
3.5	化学热力学	50
3.5.1	当量比的概念	50
3.5.2	反应热、燃烧焓与热值	51
3.6	热力学第二定律	53
3.6.1	自由能 (Gibbs 函数)	54
3.6.2	混合气体的平衡条件	55
3.7	燃烧反应中平衡组分的确定	58
3.8	绝热火焰温度	60
第 4 章	燃烧物理学	63
4.1	分子输运的三个基本定律	63
4.1.1	牛顿黏性定律	63
4.1.2	傅里叶导热定律	64
4.1.3	菲克扩散定律	65
4.1.4	无量纲相似准则——输运系数间的关系	66
4.1.5	具有宏观流动的一维双组分扩散	68
4.1.6	斯特藩流	69
4.2	基本守恒方程	71
4.2.1	总质量守恒方程 (连续性方程)	72
4.2.2	组分守恒方程 (扩散方程)	73
4.2.3	动量守恒方程	74
4.2.4	能量守恒方程	78
4.2.5	守恒量和混合分数	81

第 5 章 反应机理	83
5.1 一些重要的燃烧反应机理	84
5.1.1 一氧化碳的氧化反应	84
5.1.2 高链烷烃的氧化	85
5.1.3 甲烷-空气混合物的燃烧机理	85
5.2 简化反应机理的分析方法	88
5.2.1 准稳态分析法	88
5.2.2 部分平衡分析法	90
5.2.3 敏感度分析法	91
5.2.4 反应流分析法	94
5.2.5 化学反应系统的特征值分析法	96
5.2.6 直接关系图分析法	101
5.3 简化反应机理	103
第 6 章 着火与熄火	111
6.1 基本概念	111
6.2 封闭系统热自燃理论	112
6.2.1 热自燃条件	112
6.2.2 热自燃温度	115
6.2.3 影响自燃着火的因素	116
6.2.4 热自燃感应期	121
6.3 链自燃理论	125
6.3.1 链着火条件及自燃感应期	126
6.3.2 着火半岛理论	128
6.3.3 实际着火过程	132
6.4 点燃理论	132
6.4.1 点燃与热自燃	132

6.4.2 炽热物体点燃理论	132
6.5 开口系统的着火与熄火	136
第7章 预混合气体燃烧	141
7.1 燃烧波两种形式——缓燃及爆震	141
7.1.1 定义	141
7.1.2 一维定常流动平面波	142
7.2 层流火焰传播速度的定义及其传播机理	146
7.2.1 火焰传播速度的定义	146
7.2.2 层流火焰的内部结构及其传播机理	146
7.2.3 求解层流火焰传播方程	148
7.3 影响层流火焰传播速度的主要因素	151
7.4 火焰传播界限	154
7.5 预混火焰几何学	154
7.5.1 本生灯预混火焰的基本性质	154
7.5.2 火焰几何学	156
7.6 本生灯火焰稳定的条件	157
7.6.1 回火区的概念	157
7.6.2 火焰回火的临界条件及回火界限	159
7.6.3 火焰吹熄的临界条件及吹熄界限	160
7.6.4 火焰稳定的基本方法	162
7.7 预混合火焰传播的稳定问题	165
7.8 稳态一维层流燃烧数值模拟	166
7.9 湍流预混燃烧	171
7.9.1 湍流燃烧的特点	171
7.9.2 预混湍流火焰	172
第8章 射流扩散燃烧	176
8.1 射流扩散燃烧的特征	176

8.2 自由射流流体力学特征	179
8.2.1 湍流自由射流的守恒方程	181
8.2.2 湍流自由射流守恒方程的解	182
8.3 圆柱形自由射流扩散燃烧	184
8.3.1 守恒方程	184
8.3.2 守恒方程组的求解	186
8.3.3 射流燃烧解析分析	188
8.4 射流扩散燃烧的数值计算	192
8.4.1 模拟对象描述及网格划分	192
8.4.2 数值计算步骤	194
8.4.3 计算结果及分析	196
应 用 篇	
第 9 章 液体燃料的燃烧	201
9.1 概述	201
9.2 液滴的蒸发与燃烧	202
9.2.1 单液滴蒸发	202
9.2.2 单液滴燃烧	206
9.2.3 气流运动中单液滴的燃烧	211
9.2.4 高温壁面上的液滴蒸发	213
9.3 液体燃料的雾化与液滴群燃烧	214
9.3.1 液体燃料的雾化	214
9.3.2 液滴群的燃烧	222
第 10 章 燃烧有害物生成及控制	225
10.1 氮氧化物	225
10.1.1 氮氧化物的危害	225

10.1.2	NO _x 形成	226
10.1.3	降低 NO _x 燃烧排放的主要措施	230
10.2	一氧化碳和未燃碳氢化合物	234
10.3	颗粒物 (PM) 形成机理	235
10.3.1	燃烧过程中碳烟形成的类型及性质	236
10.3.2	碳烟的特性	237
10.3.3	颗粒物的危害	238
10.3.4	气体燃料燃烧时碳烟的生成机理	238
10.3.5	喷雾燃烧系统中微粒和碳烟的生成机理及影响因素	243
10.3.6	液体燃料燃烧时颗粒物排放量的控制	246
第 11 章	内燃机预混合压燃	248
11.1	传统柴油机和汽油机特点	248
11.2	预混合压燃工作过程及原理	249
11.3	预混合压燃的发展	250
11.4	预混合压燃中亟待解决的问题	253
11.5	射流控制压燃 (JCCI) 燃烧系统	254
11.5.1	JCCI 燃烧系统的工作过程和主要思想	254
11.5.2	JCCI 燃烧系统分类	255
参考文献		261
主要符号表		264

基 础 篇

第1章 绪 论

火，照亮了人类的智慧。继直立行走之后，火的利用与管理，确立了人类作为智慧生命不可动摇的地位。

古时，火属五行，其性最烈，忽生忽灭，来去无踪。现代化学告诉我们，与其他四行——金、木、水、土不同，火并非稳定的物质存在，而是物质向其他物质激烈演变过程中的现象。演变过程本身如今被科学地称为燃烧。

无论“燃烧”这个名词何时出现，燃烧学都是最古老也是最现代的科学分支。称其古老，是因为它可能是人类的第一个研究对象。但作为独立的分支，其历史却不到百年。做饭、取暖、照明，燃烧，近在咫尺；燃烧学，却陌生而遥远。可燃物，比比皆是；燃烧产物，林林总总；燃烧过程，千变万化。

科学源自总结，发现共性，揭示内涵。如何对如此繁杂的现象加以总结，在什么层次上寻找共性，在燃烧学领域至今仍在探讨此类问题。这就决定了燃烧学的唯象性、经验性和其不可避免的局限性、片面性，这是一门实验科学。

本章介绍燃烧学的常用术语和基本概念，以及目前燃烧学的典型研究方法。

1.1 基本概念

1. 燃烧的定义

燃烧：可燃物与氧化剂之间发生剧烈的化学反应，并伴有发光发热的现象，也包括只伴随少量热没有光的慢速氧化反应（Stephen, 2000）。

根据动力装置的特点，本书将燃烧定义限定在快速反应部分。

慢速氧化反应的典型例子是阴燃（smolder），也叫焖燃。人们最常见的阴燃是香烟的燃烧过程。

2. 可燃物

1) 可燃物的分类

凡是能与空气中的氧或其他氧化剂起燃烧化学反应的物质称为可燃物。可燃

物种种类繁多，不胜枚举。按化学结构分，可燃物可分为无机可燃物和有机可燃物两大类。无机可燃物中的无机单质有钾、钠、钙、镁、磷、硫、硅、氢等；无机化合物有一氧化碳、氨、硫化氢、磷化氢、二硫化碳、氢氰酸等。有机可燃物有：天然气、液化石油气、汽油、煤油、柴油、原油、酒精、豆油、煤、木材、棉、麻、纸以及三大合成材料（合成塑料、合成橡胶、合成纤维）等。

按物理状态，燃料分为气体燃料、液体燃料和固体燃料三类。表 1.1 列举了燃料的一般分类。

表 1.1 燃料的一般分类

燃料的物态	天然燃料	人造燃料
气体燃料	天然气	高炉煤气、焦炉煤气、发生炉煤气、石油裂化气、沼气、地下气化煤气
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、重油、渣油、煤焦油、乙醇等
固体燃料	无烟煤、烟煤、褐煤、泥煤、木材、油页岩、煤矸石	焦炭、木炭、煤粉、型煤

在众多燃烧中，以工业燃烧居于榜首。因此，本书将可燃物限定在碳氢燃料范围。

2) 燃料的化学组成

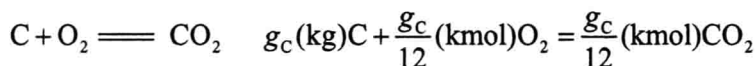
气体燃料由一些化学性质单一的单质或简单化合物组成，其中可燃性的气体有 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_nH_m 以及 H_2S 等，不可燃的气体组成有 CO_2 、 N_2 和少量的 O_2 。在气体燃料中，还有水蒸气、焦油蒸汽以及粉尘等固体微粒。

固体燃料和液体燃料中的可燃物质是各种复杂的高分子有机化合物的混合物，它们的分子结构和性质至今还不甚清楚。因此，要分析测定其化学构成是极其困难的。根据燃料的元素分析可知，这些可燃的有机化合物都是由碳、氢、氧、氮、硫等化学元素所组成。因此，在一般工程计算中（如进行燃料燃烧计算等）可认为燃料就是由这些元素组成的机械混合物，而不考虑由这些元素所构成的各有机化合物的单独性质。

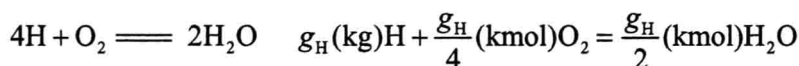
【例 1.1】在内燃机的热平衡计算中，已知某产地的柴油的 C、H、O 在燃料中的质量比例 g_C 、 g_H 、 g_O ，求该燃料完全燃烧所需理论空气量。设空气中有 21%（体积分数）的氧气。

解:

g_c (kg)C 完全反应需要氧气量:



g_H (kg)H 完全反应需要氧气量:



消耗 1 kg 燃料中的 C、H 所需氧气的物质的量为

$$\left(\frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{4} \right) (\text{kmol})O_2$$

但 1 kg 燃料中还含有 g_o (kg) 的氧, 所以完全燃烧 1 kg 燃油所需氧气的物质的量为

$$\left(\frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_o}{32} \right) (\text{kmol})O_2$$

完全燃烧 1 kg 燃油所需空气的物质的量为

$$L_0 = \frac{1}{0.21} \left(\frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_o}{32} \right) (\text{kmol})\text{空气}$$

回顾在燃烧过程中最常见的有机化合物分类、命名方法和分子结构, 某些燃料的相关信息如下。

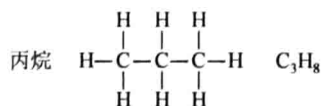
烃类

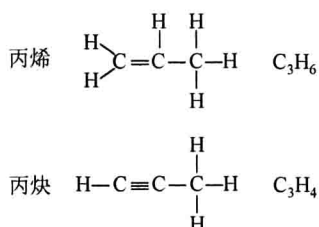
烃类燃料的各种不同结构, 一般按照是否都是 C—C 键, 或有一个 C=C 或一个 C≡C, 分子是否开链 (所有链的尾部都不相连) 或成环等结构特征来划分。烷类、烯类和炔类都是开链结构, 而环烷烃和芳香烃则都是环状结构 (表 1.2)。

表 1.2 基本烃类

族名	分子式	C—C 键	主要分子结构
烷烃类	C_nH_{2n+2}	只有单键	直链、支链, 均为开链
烯烃类	C_nH_{2n}	一个双键	直链、支链, 均为开链
炔烃类	C_nH_{2n-2}	一个三键	直链、支链, 均为开链
环烷类	C_nH_{2n} 或 $(CH_2)_n$	只有单键	环
芳香类	C_nH_{2n-6}	芳香键	环

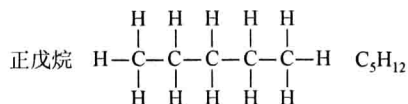
以三个碳原子为例:



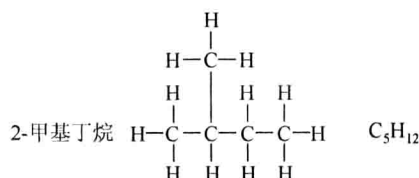


烷烃是饱和烃，说明如果不断键，就无法再加入氢原子；同时，烯烃和炔烃则都是不饱和烃，它们分别可以断掉双键和三键，形成单键和价电子，价电子可再与氢结合形成 C—H 键。以 C₃ 族为例，可以看到，丙烯加入两个氢即达到饱和： $\text{C}_3\text{H}_6 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{C}_3\text{H}_8$ ；丙炔加入 4 个氢则达到饱和： $\text{C}_3\text{H}_4 + 2\text{H}_2 \longrightarrow \text{C}_3\text{H}_8$ 。

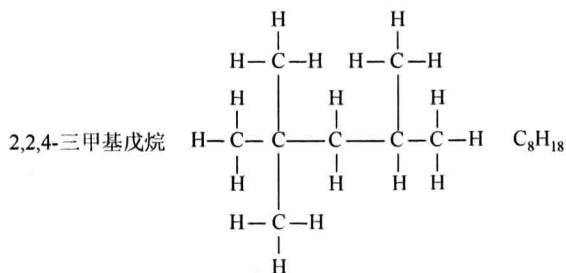
许多高碳（碳数 $n \geq 3$ ）烃往往形成支链，而并非简单的直链。直链的形式叫作正常状态，在名词前加“正”（ n -），如正戊烷，结构式为



另外，分子式相同（碳原子数和氢原子数相同）而结构式却有支链的物质叫作同分异构体。如



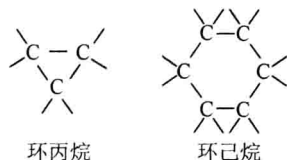
2-甲基丁烷为正戊烷的同分异构体。它们的分子式都是 C₅H₁₂。其中 2 的意思是指甲基连在第二个（从左至右）碳原子上。工程上比较重要的一个烯烃同分异构体是 2,2,4-三甲基戊烷，通常也叫作异辛烷。



异辛烷用来作火花点火发动机爆震率研究的对比燃料，它的辛烷值被定为 100。如果燃料比异辛烷更容易发生爆震，则辛烷值小于 100；相反，抗爆震能力

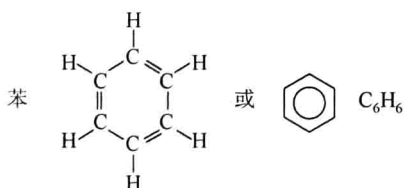
强于异辛烷的，辛烷值大于 100。

环烷的分子是闭环结构，且均为 C—C 单键，如环丙烷和环己烷，结构式分别为

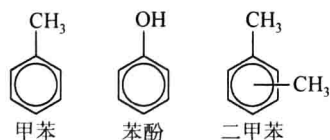


环烷并不饱和，如果断开环，还可以加入两个氢以达到饱和。更为复杂的环烷由石蜡族物质脱氢形成。

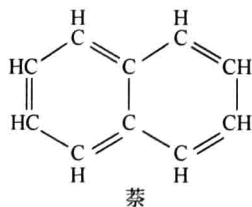
芳香烃或苯的衍生物由多个苯环组成，每个苯环又由 6 个碳组成，且每个碳只连一个氢，结构式为



苯的环结构简写为 ϕ H，其中 ϕ 为苯基 C₆H₅，于是有



多环芳烃 (PAH) 是以萘 (C₁₀H₈) 为代表的芳香环结构的组合



醇类

通常，醇类是烷烃上的氢被氢氧根取代形成的，例如

