



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 工程燃烧诊断学

娄春 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 工程燃烧诊断学

编著 姜春



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。本书全面而系统地介绍了面向工程燃烧装置的非接触式测量和诊断技术,以基于火焰自发射光谱和热辐射图像处理的技术为主,还包括了基于声学 and 激光测量的诊断技术,着重讲述了每种燃烧诊断技术的基本原理、设备装置以及在工程燃烧装置上的应用举例。全书共分 8 章,内容涉及燃烧火焰发光发热的理论基础,基于火焰自发射光谱分析的燃烧诊断,基于火焰图像处理的技术,基于热辐射反演的燃烧诊断,基于声学的燃烧诊断,基于激光的燃烧诊断。此外,本书还设计了四个实验,以方便读者开展燃烧诊断技术的实践。

本书可作为工程热物理、热能工程、动力机械与工程及相关学科专业的高年级本科生和研究生的教材,同时还可供火力发电及供热、建材生产、冶金工程、石油化工、汽车制造、航空航天等行业中从事燃烧科学研究和燃烧技术工程应用的科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程燃烧诊断学 / 娄春编著. —北京: 中国电力出版社, 2016.10

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9875-7

I. ①工… II. ①娄… III. ①燃烧理论—高等学校—教材 IV. ①TK16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 243103 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 380 千字

定价 38.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

燃烧诊断学是燃烧学的一个重要分支，是通过实验和检测直接获取数据来认识燃烧现象、开展燃烧学实践和验证燃烧学理论的学科。而工程燃烧诊断学则是燃烧诊断学的一个应用方向，是面向能源、交通、航空航天、化工和冶金等领域中工程燃烧装置的燃烧诊断。

在动力工程与工程热物理一级学科的教学和科研中，以燃烧学为主题的教材和著作比较多，主要涉及燃烧基本理论、燃烧数值建模、燃烧技术、燃烧污染物生成及防治等，但涉及燃烧诊断的内容还比较缺乏；还有一些以热物性和热物理测试技术为主题的教材和著作，涵盖了热力学、传热传质学、燃烧学、多相流热物理学等中压力、温度、流量、组分、液位等参数的通用测试方法和手段，主要介绍了燃烧测量技术的基本原理，与实际燃烧对象的结合还不够系统深入；而以燃烧诊断为专题内容的教材和著作有汪亮编著的《燃烧实验诊断学》、熊姘和范玮编写的《应用燃烧诊断学》以及德国 Katharina Kohse-Höinghaus 等编著的《应用燃烧诊断学》等，这些书籍主要介绍了基于激光的燃烧诊断技术及其在实验室等小型燃烧火焰上的应用，还有周怀春著的《炉内火焰可视化检测原理与技术》，介绍大型炉膛内火焰图像处理及三维温度场可视化技术。

本书则是立足于燃烧诊断技术的工程应用，考虑到工程燃烧装置中的燃烧是存在于大尺度空间的高温物理化学过程，具有典型的三维特征和脉动特性；以及燃烧测试技术的发展趋势是从接触式测量到非接触式测量、从离线测量到在线测量，从一维测量到二维、三维测量，从单一物理参数测量到多类物理参数同时测量。而且，工程燃烧诊断不只是测量燃烧过程的热物理参数，还需根据测量结果对燃烧过程进行分析和诊断。因此，本书取名为《工程燃烧诊断学》，以期对国内燃烧诊断学教材做有益补充，同时，本书还可作为从事燃烧科学研究和燃烧技术工程应用的科技人员的参考书。本书的结构体系主要是以工程燃烧装置中火焰自发射光谱和热辐射的检测、分析和处理为基础，这属于被动燃烧检测技术，此外，还介绍了基于声学和激光的燃烧诊断技术，这属于主动检测技术。在加强燃烧诊断技术基础理论的同时，还强调与工程燃烧装置的实际特点相结合，并引进最新科研成果。最后，本书还设计了四个燃烧诊断的实验，以便读者自行实践。

编者自1999年9月起一直在华中科技大学煤燃烧国家重点实验室从事燃烧测量与诊断的教学和科研工作，以第一负责人先后获得了国家自然科学基金（50806026、51176059）、教育部博士点基金（200804871140）、科技部科技伙伴计划（KY201401003）、武汉东湖高新区第六批“3551”光谷人才计划（武新管〔2013〕82号）、华中科技大学自主创新研究基金（2010MS047、2012QN172、2014ZZGH003）、煤燃烧国家重点实验室开放基金（FSKLCC1402）等科技项目的资助，本书的编写和出版得到了上述科研基金以及华中科技大学教材建设基金的支持。感谢恩师周怀春教授、华中科技大学能源与动力工程学院和煤燃烧国家重点实验室的老师和同事、热辐射与燃烧诊断课题组的师兄弟姐妹及研究生们对编者的各种支持，他们为本书提供了部分资料。此外，家人的支持和关爱让编者能更用心的投入书稿的编写，使本

书得以顺利完成。

本书在编写过程中参考了国内外的有关教材和文献，由于学识和水平所限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。联系邮箱：Lou\_chun@sina.com。

编者

2016年10月于武汉

## 目 录

前言	
<b>第 1 章 工程燃烧诊断概述</b>	1
1.1 燃烧能源	1
1.2 工程燃烧装置	5
1.3 工程燃烧诊断的重要性	12
1.4 工程燃烧诊断技术概述	15
习题	20
参考文献	20
<b>第 2 章 燃烧火焰发光发热</b>	21
2.1 燃烧火焰自发射光谱	21
2.2 燃烧火焰热辐射	26
2.3 燃烧火焰中介质热辐射特性	30
2.4 燃烧火焰中辐射传递方程及其求解方法	38
习题	56
参考文献	56
<b>第 3 章 基于火焰自发射光谱分析的燃烧诊断</b>	57
3.1 燃烧火焰自发射光谱检测方法	57
3.2 燃烧火焰自发射光谱定性分析	67
3.3 工程燃烧装置中火焰自发射光谱诊断	77
习题	86
参考文献	86
<b>第 4 章 基于火焰图像处理的燃烧诊断</b>	87
4.1 燃烧火焰图像检测方法	87
4.2 基于火焰可见光图像的燃烧诊断	93
4.3 基于瞬态火焰图像的燃烧诊断	106
4.4 基于火焰红外图像的燃烧诊断	121
习题	127
参考文献	128
<b>第 5 章 基于热辐射反演的燃烧诊断</b>	129
5.1 热辐射反演基本理论	129
5.2 工程燃烧装置中热辐射成像模型	136

5.3	工程燃烧装置中三维温度场反演	141
5.4	工程燃烧装置中温度和热辐射参数同时反演	159
	习题	168
	参考文献	169
<b>第 6 章</b>	<b>基于声学的燃烧诊断</b>	<b>170</b>
6.1	燃烧热声不稳定诊断	170
6.2	声波法测量燃烧温度场	177
6.3	声波法测量速度场的原理和技术	186
	习题	195
	参考文献	195
<b>第 7 章</b>	<b>基于激光的燃烧诊断</b>	<b>197</b>
7.1	激光诊断技术概况	197
7.2	实验室燃烧火焰的激光诊断	221
7.3	激光诊断在工程燃烧装置中的应用	229
	习题	234
	参考文献	234
<b>第 8 章</b>	<b>燃烧诊断实验</b>	<b>236</b>
8.1	火焰光谱检测实验	236
8.2	可见光图像热辐射标定实验	238
8.3	火焰温度图像检测实验	239
8.4	火焰脉动特性检测实验	241
	习题	242
	参考文献	242

# 第1章 工程燃烧诊断概述

## 1.1 燃烧能源

能源是人类社会发展中最重要资源，能够为人类提供各种形式的能量。根据世界能源理事会（World Energy Council）公布的数据，能源主要包括煤炭、石油、天然气、水能、生物质能、太阳能、地热能、风能、海洋能和核能等。这些能源在一定条件下可以转换为人们所需的某种形式的能量，如机械能、电磁能、热能、化学能、辐射能等。能源有很多种形式，可以按能量的来源、形成、使用分类，或者从技术、环保角度进行分类，以反映各种能源的特征，例如煤炭、石油、天然气可统称为化石燃料或化石能源。在本书中，根据能源的性质和利用方式，以及本书的主题，将其分为燃烧能源和非燃烧能源。燃烧能源包括化石燃料（煤炭、石油、天然气）及其衍生的乙醇等化工燃料、生物质燃料（木材、秸秆、沼气等）以及用于燃烧发电的垃圾燃料等；非燃烧能源则包括了水能、太阳能、地热能、风能、海洋能和核能等。同时，从自然界获取的未经加工或转换的能源称为一次能源，如煤炭、石油、天然气、生物质等燃料，以及太阳能、风能、水能、核能等；通过对一次能源的加工或者转换可得到二次能源，如从煤炭、石油、天然气衍生的各种化工燃料，以及电力、热水、蒸汽等。

能源是世界上每一个国家国民经济的重要基础，世界能源理事会、英国石油公司（British Petroleum, BP）以及世界各国政府等机构均会给出世界各国能源的年度产量和消费量等统计年鉴。在这些统计年鉴中，英国石油公司发布的《BP 世界能源统计年鉴》提供了关于世界能源市场的高质量、客观且全球一致的数据，是能源经济学领域内最受推崇且最具权威性的出版物之一，也是媒体、学术界、各国政府和能源企业的参考年鉴。

图 1-1 是《2015 年 BP 世界能源统计年鉴》给出的 1990~2014 年全球能源消费量，其中，可再生能源是以可再生资源发电总量为基准，包括风能、地热、太阳能、生物发电和垃圾发电。从图 1-1 中可见，以石油、煤炭和天然气为主的燃烧能源（还包括可再生能源中的生物质燃料和垃圾燃料）是全球能源消费的重要来源。

表 1-1 是从《2015 年 BP 世界能源统计年鉴》中得到的 2013、2014 年全世界及几个主要国家的分燃料消费量，其中，石油消费以百万吨为单位计量；其他燃料以百万吨油当量为单位计量。从表 1-1 中可见，中国和美国是燃烧能源消费的大国，其总和占当年度全世界燃烧能源消费量的 40% 左右。

表 1-1 2013、2014 年全世界及几个主要国家的分燃料消费量

单位： （百万吨 油当量）	2013 年							2014 年						
	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生 能源	总计	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生 能源	总计
中国	503.5	153.7	1961.2	25.3	208.2	81.6	2933.6	520.3	166.9	1962.4	28.6	240.8	95.5	3014.5
美国	832.1	675.8	454.6	187.9	61.4	99.1	2310.9	836.1	695.3	453.4	189.8	59.1	110.8	2344.6



续表

单位: (百万吨 油当量)	2013 年							2014 年						
	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生 能源	总计	石油	天然气	煤炭	核能	水电	可再生 能源	总计
俄罗斯	146.8	372.1	90.5	39.0	41.3	0.1	689.9	148.1	368.3	85.2	40.9	39.3	0.1	681.9
德国	113.4	74.2	81.7	22.0	5.2	48.0	344.5	111.5	63.8	77.4	22.0	4.6	52.3	331.6
法国	79.3	38.6	11.8	95.9	15.8	10.4	251.7	76.9	32.3	9.0	98.6	14.2	11.5	242.5
印度	175.3	46.3	324.3	7.5	29.8	21.0	604.2	180.7	45.6	360.2	7.8	29.6	23.6	647.5
日本	207.5	102.2	128.6	3.3	19.0	13.1	473.7	196.8	101.2	126.5	0.0	19.8	17.2	461.6
世界 总计	4179.2	3052.8	3867.0	563.7	861.6	458.4	12983	4211.1	3065.5	3881.8	574.0	879.0	518.8	13130.3

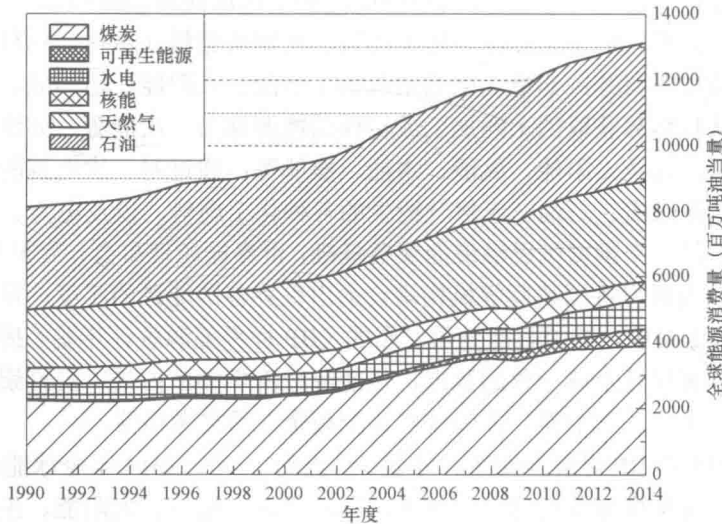


图 1-1 1990~2014 年全球能源消费量

燃烧能源在利用过程中或多或少都会对环境造成污染,随着环保要求的增加,越来越多的人希望未来能更多地使用太阳能、风能、地热能等清洁能源。但根据 BP 公司发布的《2035 世界能源展望》,在未来相当长的一段时间内,燃烧能源仍然是能源消费的主体。图 1-2 给出了 1990~2035 年全球能源消费统计及展望。从图 1-2 中可以看出,在展望期内(2015~2035 年),化石燃料继续提供世界上大多数的能源。其中,煤炭增长放慢,2000 年以来,从增速最快的化石燃料(年均 3.8%)变为增速最慢的化石燃料(年均 0.8%);天然气是增速最快的化石燃料(年均 1.9%),而石油增速略高于煤炭(年均 0.8%);可再生能源增速最快(年均 6.3%);核电(年均 1.8%)和水电(年均 1.7%)的增长快于总体能源增速。到 2035 年,每种化石燃料的比重都集中在 26%~28%的区间,没有出现任何一种主导性燃料,虽然化石燃料总体比重预计从 2015 年的 86%降至 81%,但仍是主导性能源。

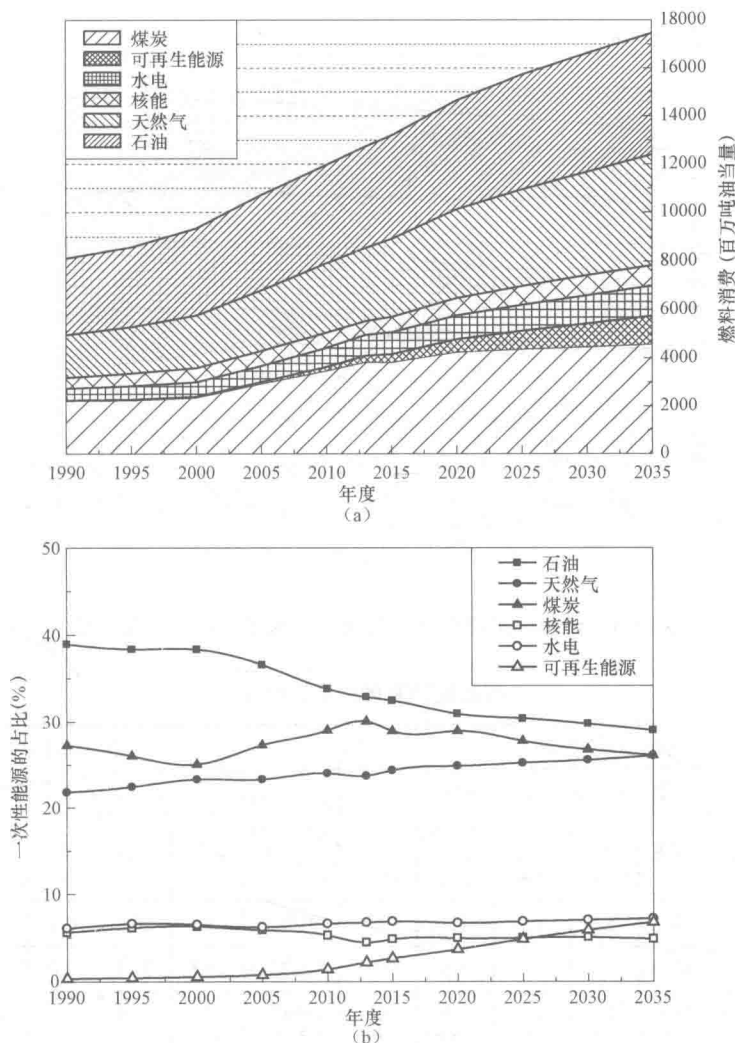


图 1-2 1990~2035 年全球能源消费统计及展望

(a) 展望 2035 年的燃料消费; (b) 展望 2035 年的一次能源占比

随着世界继续保持电气化的长期趋势, 预计发电在一次能源消费中的比重将不断提高: 从 2014 年的 42% 提高至 2035 年的 47%。发电是所有燃料争相竞争的行业, 发电因此将在全球燃料结构演变方面发挥重要作用。图 1-3 给出了 1990~2035 年用于发电的一次燃料的统计及展望。发电行业的各燃料占比发生了变化: 石油比重在不断下降; 核电比重比 2000 年开始有所下降; 天然气比重从 20 世纪 90 年代开始不断上升。在《2035 世界能源展望》中, 最大的转变是可再生能源比重提高以及煤炭比重下降。到 2035 年, 发电行业的燃料组合将更加均衡和多元化。煤炭仍将是主导性燃料, 在发电燃料中占 1/3 以上, 但其占比将低于 2014 年的 44%, 煤炭与其他燃料的份额差距大幅缩小。

对于中国, 快速持续增长的经济带来了巨大的能源需求, 以煤炭为主的燃烧能源在能源结构中仍然占主导地位。根据中国国家统计局能源统计司发布的《中国能源统计年鉴—2014》<sup>[1]</sup>, 见表 1-2, 我国能源消费总量中, 煤炭一直占 70% 以上, 石油占 20% 左右, 到

2012年天然气增加到5.6%。

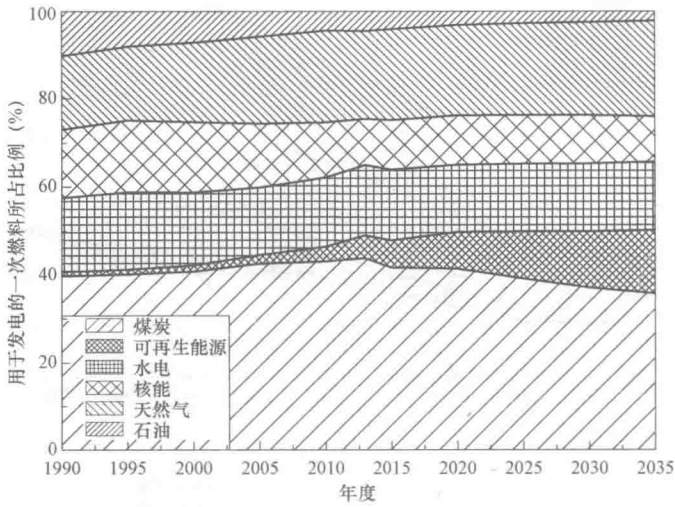


图 1-3 1990~2035年用于发电的一次燃料的统计及展望

表 1-2

我国能源消费总量和构成

年份	电热当量计算法							发电煤耗计算法						
	能源消费总量(万 t 标准煤)	占能源消费总量的比重 (%)						能源消费总量(万 t 标准煤)	占能源消费总量的比重 (%)					
		煤炭	石油	天然气	水电、核电、其他能发电				煤炭	石油	天然气	水电、核电、其他能发电		
				其他	水电	核电					其他	水电	核电	
1990	95384	79.0	17.2	2.1	1.7	1.7	—	98703	76.2	16.6	2.1	5.1	5.1	—
1991	100413	78.7	17.7	2.1	1.5	1.5	—	103783	76.1	17.1	2.0	4.8	4.8	—
1992	105602	78.3	18.1	2.0	1.6	1.6	—	109170	75.7	17.5	1.9	4.9	4.9	—
1993	111490	79.0	17.1	2.1	1.8	1.8	—	115993	74.7	18.2	1.9	5.2	5.1	—
1994	118071	79.5	16.2	2.2	2.1	2.0	0.1	122737	75.0	17.4	1.9	5.7	5.2	0.5
1995	123471	77.0	18.6	1.9	2.5	2.4	0.1	131176	74.6	17.5	1.8	6.1	5.7	0.4
1996	129665	76.7	19.5	1.9	1.9	1.8	0.1	135192	73.5	18.7	1.8	6.0	5.7	0.4
1997	130082	74.9	21.3	1.8	2.0	1.9	0.1	135909	71.4	20.4	1.8	6.4	5.9	0.4
1998	130260	74.2	21.8	1.9	2.1	2.0	0.1	136184	70.9	20.8	1.8	6.5	6.1	0.4
1999	135132	73.6	22.3	2.1	1.9	1.8	0.1	140569	70.6	21.5	2.0	5.9	5.5	0.4
2000	139445	72.4	23.1	2.3	2.1	2.0	0.1	145531	69.2	22.2	2.2	6.4	5.9	0.4
2001	142972	71.9	23.0	2.6	2.6	2.4	0.2	150406	68.3	21.8	2.4	7.5	7.1	0.4
2002	151789	71.5	23.4	2.6	2.6	2.4	0.2	159431	68.0	22.3	2.4	7.3	6.8	0.5
2003	176074	73.1	22.1	2.6	2.5	2.0	0.3	183792	69.8	21.2	2.5	6.5	5.7	0.8
2004	204219	72.8	22.2	2.6	2.5	2.2	0.3	213456	69.5	21.3	2.5	6.7	5.9	0.8
2005	225781	74.1	20.7	2.8	2.5	2.2	0.3	235997	70.8	19.8	2.6	6.8	5.9	0.8
2006	247562	74.3	20.2	3	2.5	2.2	0.3	258676	71.1	19.3	2.9	6.7	5.9	0.7
2007	268413	74.3	19.7	3.5	2.6	2.2	0.3	280508	71.1	18.8	3.3	6.8	5.9	0.8

续表

年份	电热当量计算法							发电煤耗计算法						
	能源消费总量 (万 t 标准煤)	占能源消费总量的比重 (%)						能源消费总量 (万 t 标准煤)	占能源消费总量的比重 (%)					
		煤炭	石油	天然气	水电、核电、其他能发电				煤炭	石油	天然气	水电、核电、其他能发电		
					其他	水电	核电				其他	水电	核电	
2008	277515	74.9	19.2	2.9	3.0	2.6	0.3	291448	70.3	18.3	3.7	7.7	6.7	0.8
2009	292028	74.0	18.8	4.1	3.1	2.6	0.3	306647	70.4	17.9	3.9	7.8	6.5	0.8
2010	307987	71.9	20	4.6	3.5	2.9	0.3	324939	68.0	19.0	4.4	8.6	7.1	0.7
2011	331173	72.0	19.5	5.2	3.3	2.6	0.3	348002	68.4	18.6	5.0	8.0	6.4	0.8
2012	341094	70.6	19.9	5.6	3.9	3.1	0.4	361732	66.6	18.8	5.2	9.4	7.6	0.8

从上述能源统计数据中可见,无论是现在还是不久的将来,燃烧能源在能源消费中的占据非常大的比重,并占有绝对的重要性,其利用过程中的经济性、安全性以及污染物排放是关注的重点。

## 1.2 工程燃烧装置

能源,尤其是燃烧能源,在电力、冶金、石油化工、交通、航空航天等诸多领域中得到广泛的应用。图 1-4 给出了 BP 公司 1990~2035 年各行业能源消费情况的统计及展望。从图 1-4 中可见,在过去几十年以及未来二十年中,交通、电力生产和工业是能源消费的主要来源。成立于 1954 年的国际性非盈利的科教组织——国际燃烧学会(The Combustion Institute)则明确指出:交通和电力生产很大程度上依赖于化石和替代燃料的燃烧,世界范围内 2/3 以上的能源供给是用于这两个目的;重要的制造过程,像钢铁和玻璃制作需要使用燃烧能源;各种车辆、舰船和航空器引擎的发展,微型燃烧器和大型燃烧炉膛的设计根源也在于燃烧科学。也就是说,在交通、电力生产和工业中,燃烧煤炭、石油、天然气等燃烧能源,将化学

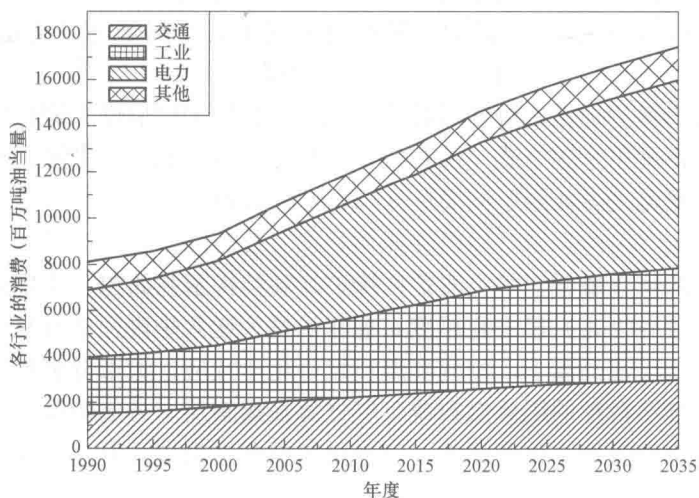


图 1-4 1990~2035 年各行业能源消费情况的统计及展望

能转换为热能,是为上述行业提供热能、机械能和电能的主要途径。因此,燃烧能源的合理利用,有助于应对能源的可持续发展和气候变化这两大当今人类文明面临的挑战。

燃烧是物质发生激烈的化学反应而发热和发光的现象。在自然界中,这种广泛存在的自然现象又被称作“火”。随着工业技术的发展和进步,人们在利用燃烧能源的过程中,研制了多种类型的工程燃烧装置。在实际应用中,燃料和氧化剂通过一定的途径输送至工程燃烧装置中,并使它们按预定方式混合,进而发生燃烧反应并释放出大量的热量,以满足预定工业过程的需要。根据燃烧目的的不同,工程燃烧装置可分为两类<sup>[2]</sup>。一类是燃烧炉,利用火焰以及燃烧生成物来产生热量,通过热交换还可以产生蒸汽或热水(锅炉),所产生的热量可用于加热物料(工业窑炉),以满足金属冶炼、锻造加工、热处理以及玻璃、陶瓷、建材等熔化、煅烧、烧成、烧结、干燥等材料加工处理过程的需要;产生的蒸汽或热水可以推动蒸汽轮机输出机械能或用于供暖。燃烧炉的空间一般有较大容积,通称为炉膛,在高温下有很强的热辐射。另一类工程燃烧装置是热机,其目的是直接利用燃烧反应产生的高温高压燃气作为工质推动活塞(活塞式内燃机)或叶轮(燃气轮机),将热能转变为机械能。活塞式内燃机和燃气轮机的燃烧空间一般都不大,可称为燃烧室。但斯特林发动机(热气机)是一个例外,它是用加热后的工质做功,多用于为舰船提供动力,所以其燃烧室很小。下面介绍几种主要的工程燃烧装置及其特点。

### 1.2.1 锅炉

锅炉是利用燃料燃烧释放的热能加热给水,以获得规定温度、压力和品质的蒸汽的设备,由锅和炉两大部分组成。其中,炉也称为炉膛,是燃料燃烧放热的空间,与之有关的设备包括燃烧器、燃料和配风给及装置等;锅是容纳水和蒸汽并接收热量的容器,包括锅筒和由大量钢管制成的炉膛水冷壁、过热器、换热器等。燃料在炉膛中燃烧所产生的高温烟气,通过辐射、对流和导热三种传热方式,将烟气中的热量传递给锅侧的水,从而产生热水或蒸汽。锅炉内包含燃料燃烧、热量交换和工质汽化三种过程,其产生的热水或蒸汽可直接为生产和生活提供所需要的热能,也可通过蒸汽动力装置转换为机械能,再通过发电机将机械能转换为电能。按用途不同,锅炉可分为供暖锅炉、工业锅炉、舰船锅炉和电站锅炉;按所燃用的燃料不同,锅炉可分为燃烧煤、生物质、废弃物等固体燃料的锅炉、燃油锅炉和燃气锅炉;按燃烧方式不同,锅炉可分为层燃炉、流化床锅炉和室燃炉。

燃烧固体燃料的锅炉根据入炉燃料的尺寸大小,分别采用层燃、流化床和室燃方式。燃油锅炉和燃气锅炉都采用室燃方式,油和气体燃料分别以雾状和气态随同空气喷入炉膛内做悬浮燃烧。下面根据燃烧方式的不同简单介绍锅炉的特点。

#### 1. 层燃锅炉

采用层燃方式的固体燃料锅炉主要是炉排炉,其结构示意图如图 1-5 所示,固体燃料(煤块、生物质和固体废弃物等)以一定厚度布置在炉排上送入炉内,空气从炉排下的通风空隙穿过燃料层向上流动,在高温下,空气和燃料发生化学反应,大部分燃料在炉排上的燃料层中燃烧,只有少数细小颗粒的固体燃料或可燃气在燃料层上方的炉膛空间中燃烧。目前,炉排炉主要用于焚烧垃圾等固体废弃物,但当燃料中含水量较大时,炉内燃烧温度达不到要求,需要投放燃油助燃。

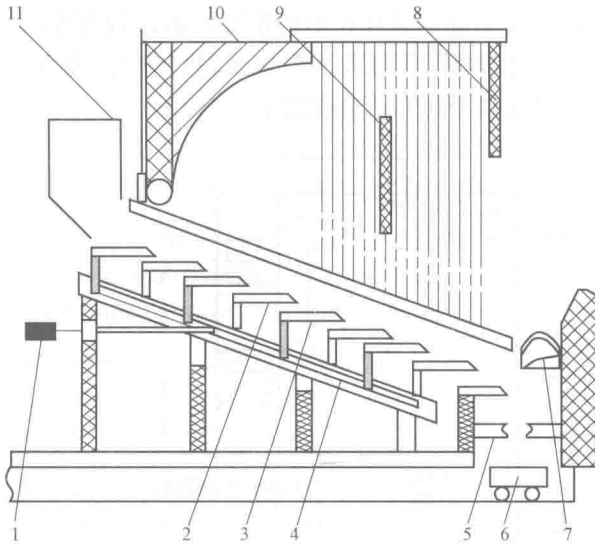


图 1-5 炉排炉结构示意图

1—转动机构；2—固定炉排片；3—活动炉排片；4—连杆；5—余燃炉片；6—灰渣车；  
7—炉灰门；8—后隔墙；9—中隔墙；10—前拱；11—煤斗

## 2. 流化床锅炉

采用流化床燃烧方式的固体燃料锅炉是流化床锅炉，其气体动力学基础是固体物料的流化态，即固体燃料颗粒在与流动的流体混合后，能像流体那样自由流动，其技术本身由第一代鼓泡流化床发展到第二代循环流化床。循环流化床锅炉的炉内流化风速较高（一般为 $4\sim 8\text{m/s}$ ），在炉膛出口加装了气固物料分离器。被烟气携带排出炉膛的细小固体颗粒，经分离器分离后，再送回炉内燃烧床上循环燃烧。如图 1-6 所示，循环流化床锅炉可分为两个部分：第一部分由炉膛、烟气气固物料分离器、固体物料再循环设备等组成，上述部件形成了一个固体物料循环回路；第二部分为对流烟道，布置有过热器、再热器、省煤器和空气预热器等，用于吸收燃烧所产生的部分热量。循环流化床锅炉燃烧所需的一次风和二次风分别从炉膛的底部和侧墙送入，炉内的大颗粒被一次风吹起来，处在悬浮状态，具有流体的性质，大颗粒的燃烧主要在炉膛中完成，而小颗粒被气流带出炉膛，在炉膛出口的气固分离装置中被收集并通过返料装置送回炉膛，这部分成了循环燃烧，于是得名循环流化床锅炉。

循环流化床锅炉的特点是：燃料适应性广，由于炉内气-固和固-固混合非常好，只要燃料的热值大于加热燃料和所需空气至着火温度所需的热量，即可使循环流化床锅炉燃用任何燃料；燃烧效率比炉排炉高，接近下面将要提到的煤粉炉；由于是低温分段燃烧，其氮氧化物排放较低。循环流化床锅炉多用于燃烧劣质煤以及生物质燃料。

## 3. 室燃锅炉

采用室燃方式的固体燃料锅炉主要是煤粉炉，其特点是煤以粉状形态随空气喷入炉膛中进行燃烧，这也是大型电站锅炉的主要形式。如图 1-7 所示，在煤粉炉中，原煤首先要在磨煤机中磨制成合格的煤粉，再由预热空气通过排粉风机将煤粉经燃烧器喷入炉内，煤粉颗粒悬浮在炉膛空间中燃烧，形成火焰并产生高温烟气，高温烟气以不同的换热方式将热量传给

锅炉中的受热面。其中，煤粉燃烧器是煤粉炉的重要设备，按其出口流动特性可分为直流燃烧器和旋流燃烧器两大类，燃烧器的主要作用是组织煤粉气流，加强一、二次风气流的混合，保证煤粉气流及时、稳定着火以及煤粉火焰的稳定。

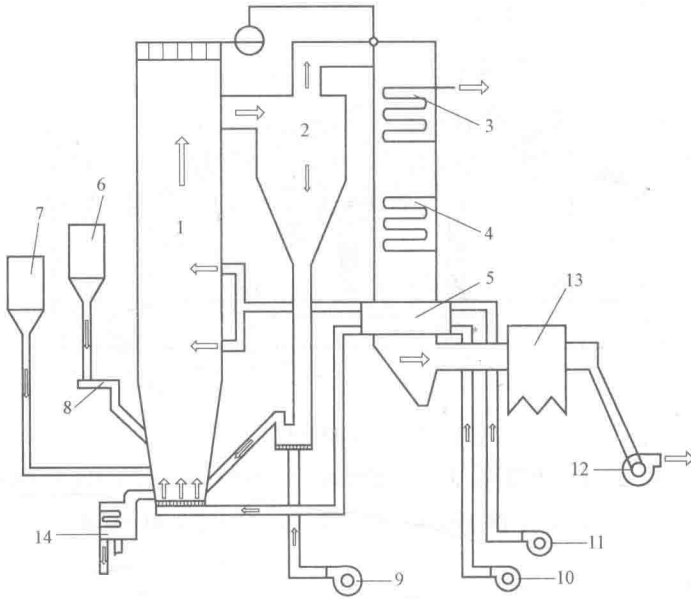


图 1-6 循环流化床锅炉结构示意图

1—燃烧室；2—旋风分离器；3—过热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—燃煤仓；7—给粉机；8—石灰石粉仓；  
9—高压鼓风机；10—一次风机；11—二次风机；12—引风机；13—除尘器；14—底灰冷却器

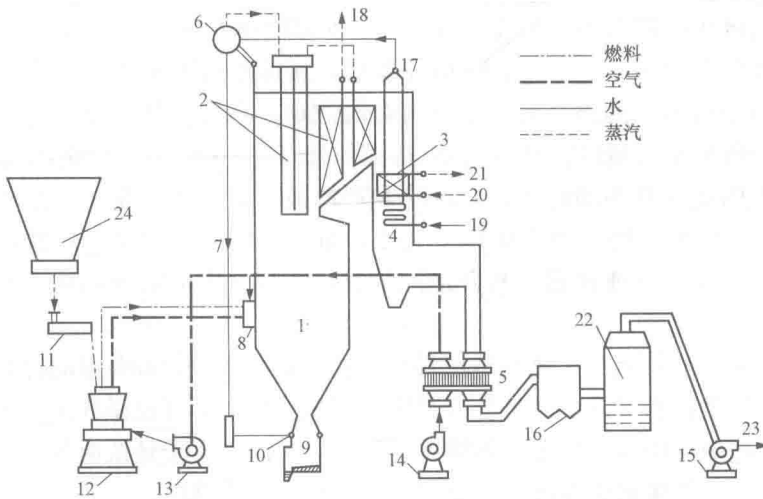


图 1-7 煤粉炉结构示意图

1—炉膛及水冷壁；2—过热器；3—再热器；4—省煤器；5—空气预热器；6—汽包；7—下降管；8—燃烧器；  
9—排渣装置；10—联箱；11—给粉机；12—磨煤机；13—送粉风机；14—送风机；15—引风机；  
16—除尘器；17—省煤器出口联箱；18—过热蒸汽；19—给水；20—再热蒸汽进口；  
21—再热蒸汽出口；22—脱硫装置；23—排烟；24—煤仓



在燃油锅炉中,燃料油先雾化成细小油滴后再喷入炉膛内,这可以增加燃料油的表面积,易于空气混合而迅速燃烧并放热。油燃烧器是燃油锅炉的重要设备,主要由雾化器和配风器组成。雾化器分为机械式雾化器(包括离心式和旋杯式)和介质式雾化器(以蒸汽或空气为介质)两大类,前者是借送入燃烧器的油的压力,使油从许多细孔道中流入带有切向槽的雾化片中,以很大速度进入雾化片中心的旋涡室中做高速旋转而喷出并形成空心圆锥状雾化炬;后者利用高速蒸汽流的喷射使油料雾化,喷头上由油孔、汽孔和混合孔三者构成Y字形排列,油、汽进入混合孔相互撞击,形成乳化状态的油气混合物,然后由混合孔喷入炉膛形成雾化炬。配风器按气流流动的方式可分为旋流式和直流式两大类。其中,旋流配风器根据旋流叶片的结构可分为轴向叶片式和切向叶片式;直流配风器又可分为平流式和纯直流式两种。对于油燃烧器,必须提高雾化质量、保证均匀配风、保持雾化器在配风中的合理位置、使雾化特性与空气动力特性相适应,才能保证获得稳定、完全、低污染的燃烧。燃油锅炉主要是以轻油(如柴油、煤油)、重油、渣油或原油为燃料,多用于为工业过程和日常生活提供所需的热能、蒸汽、热水等。

燃气锅炉主要是燃用天然气和高炉煤气。气体燃料的燃烧属于气相反应,其着火和燃烧比固体燃料容易得多,燃烧速度和燃烧的完全程度主要取决于气体燃料与氧化剂气流(多为空气)的混合。气体燃料的燃烧方式主要有扩散式燃烧,部分预混式燃烧和完全预混式燃烧,扩散式燃烧是指气体燃料与氧化剂气流在燃烧前无混合,而部分预混式和完全预混式燃烧则是指气体燃料和氧化剂气流在着火前即混合在一起,只是混合程度有所不同。燃烧器的设计要求燃烧稳定、安全、效率高、达到所需的热负荷。此外,工业上所用的燃气锅炉还对火焰长度、燃烧温度等有所要求。

### 1.2.2 工业窑炉

工业窑炉是加热或融化金属或非金属材料设备,广泛应用于国民经济的各行各业中,品种繁多,是工业过程中主要的高能耗设备,其行业分类如图1-8所示。

从图1-8中可见,工业窑炉主要用于陶瓷、耐火建材生产、玻璃制造、水泥生产、钢铁及有色金属冶炼以及石油化工等行业,以完成材料的熔化、精炼、热加工、热处理以及烧成、烧结等工艺过程。在实际应用中,习惯将用于金属材料处理的设备称为工业炉,而将用于水泥、玻璃、陶瓷等硅酸盐类非金属材料处理的设备称为窑炉。

在玻璃制造过程中,是以燃烧燃料的方式为窑炉提供热量,燃料包括重油、天然气、焦炉煤气等,窑炉结构一般包括玻璃熔制、热源供给、余热回收和供气排烟四个部分。水泥生产则根据水泥煅烧成熟料窑的结构分为立窑和回转窑。其中,立窑的窑筒体呈竖直不动,通过人工或机械方式加料,但生产规模较小;而回转窑的窑筒体略带斜度卧置,并做低速回转,生料自高端(窑尾)喂入,向低端(窑头)运动,燃料自低端吹入,产生火焰,将生料烧成熟料,烟气由窑尾排出。钢铁行业中,炼钢高炉是用钢板作炉壳,壳内砌耐火砖内衬,高炉本体自上而下分为炉喉、炉身、炉腰、炉腹、炉缸五个部分。高炉生产时从炉顶装入铁矿石、焦炭、石灰石熔剂,从位于炉子下部沿炉周的风口吹入经预热的空气,有的高炉也喷吹煤粉、重油、天然气等辅助燃料,在高温下经过燃烧、还原反应等一系列复杂的物理化学过程,生



图 1-8 工业窑炉分类



产出铁水，以及副产高炉渣和高炉煤气；转炉则是炼钢的主体设备，由炉帽、炉身和炉底组成，炉帽是一上大下小的正方形截圆锥体，炉帽以下、熔液表面以上的圆筒为炉身部分，熔池面以下为炉底部分；轧钢厂加热炉则是将待轧制的钢坯加热到一定温度，然后轧制成符合要求的钢产品。

从上面的叙述可以总结出：按用途不同，工业窑炉还可分为加热炉和熔炼炉两大类。加热炉是在炉内使某种物料得到加热的设备，如轧钢加热炉、锻造加热炉、热处理炉、焙烧炉、炼焦炉、煤气发生炉、裂解炉、干燥炉等；熔炼炉是在炉内使物料加热并熔炼的设备，如高炉、转炉、回转窑、玻璃熔窑等。此外，按提供热量的方式不同，工业窑炉也可分为燃料炉和电加热炉。燃料炉是用煤、焦炭等固体燃料，重油、柴油等液体燃料，以及天然气、煤气等气体燃料燃烧提供热量。在燃料炉中，加热过程依靠燃烧火焰来实现，按照加热方式不同，燃料炉又分为直接加热和间接加热。直接加热（即明火加热）是指燃烧生成物直接与加热物料相接触；间接加热时指燃烧生成物不直接接触被加热物料，而是借助某种换热元件实现热量传递。

工业窑炉的燃料种类包括各种气体、液体、固体燃料。燃气燃料的工业窑炉采用各种气体燃烧器使气体燃料与氧化剂气流（大多为空气）进行混合，有内部混合、外部混合和半混合式烧嘴三大类。燃油等液体燃料为工业窑炉采用的油喷嘴，多数按雾化方式进行分类，但油喷嘴的种类比气体燃烧器少，配风器的类型和构造与气体燃烧器大体相同。油喷嘴的主要类型有高压雾化喷嘴、低压空气雾化喷嘴、油压雾化（机械雾化）喷嘴和转杯式喷嘴等，其中采用压缩空气或蒸汽作为雾化介质的高压雾化喷嘴又分为内混式和外混式高压雾化喷嘴。一般来说，工业炉窑的炉内温度要高于锅炉炉膛内温度，因此工业炉窑使用的油喷嘴和煤气喷嘴本体多数采用耐热结构，如在烧嘴壳体内表面衬以耐火材料。除了使用气体燃料和燃油之外，工业窑炉还以煤、焦炭等固体燃料作为热源，燃烧方式有层燃和煤粉燃烧两种。层状燃烧方式类似于层燃锅炉中的情况，多用于热处理加热炉、锻造加热炉等。煤粉燃烧方式类似于煤粉锅炉中的燃烧，这种燃烧方式可用于水泥回转窑、高炉和石化工业加热炉等，但相比油燃烧器和气体燃烧器则较少采用。

### 1.2.3 内燃机

内燃机是一种动力机械，以液态油或可燃气体为燃料，它是通过燃料在机器内燃烧，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燃气轮机等。但通常所说的内燃机是指活塞式内燃机，并且以往复式最为普遍，主要包括柴油机和汽油机，随着新型燃料出现还包括替代燃料内燃机。内燃机将燃料和空气混合，在气缸中燃烧产生高温高压燃气，并依靠燃气膨胀推动活塞往复运动，将燃料燃烧释放出的热能转换为机械功。

内燃机的组成部分主要有曲柄连杆、气缸、配气机构、供油系统、润滑系统、冷却系统、起动装置等。气缸是一个圆筒形金属机件，内置一可做直线往复运动的活塞，活塞顶部与气缸盖之间的小空间构成内燃机的燃烧室，活塞通过连杆与曲轴相连，如图 1-9 所示。燃料和空气分别由内燃机的供油系统和配气机构喷入燃烧室，形成可燃混合气体并迅速燃烧。气缸中的热量迅速释放产生高温高压燃气，并急剧膨胀，推动活塞做往复运动，进而通过曲柄连杆机构带动曲轴旋转，将作用在活塞上的燃气压力转变为转矩，通过曲轴向外输出。