

(陕)新登字 009 号

【内容简介】本书是根据西北工业大学、北京航空航天大学、南京航空学院共同制定的热能工程专业燃料与燃烧课程教学大纲编写的。内容包括燃料及燃料燃烧的热工计算；燃烧理论的基本知识；气体燃料、液体燃料及固体燃料(煤)的燃烧规律及燃烧技术；燃烧引起的污染及其防治。内容比较全面，不仅适用于航空院校，也适用于其他院校的热能工程或动力工程专业，还可供广大从事燃料与燃烧的科技工作者和高等学校教师参考。

高等学校教材
燃料与燃烧

顾恒祥 主编

责任编辑 蒋相宗

责任校对 享 邑

*

©1993 西北工业大学出版社出版
(西安市友谊西路 127 号 邮编 710072)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0411-6/TK·3(课)

*

开本 787×1092 毫米 1/16 14.5 印张 345 千字

1993 年 6 月第 1 版 1993 年 6 月第 1 次印刷

印数：1—1 500 册 定价：3.83 元

前 言

本书根据西北工业大学、北京航空航天大学、南京航空学院共同制定的热能工程专业燃料与燃烧课程教学大纲编写。

燃料与燃烧是热能工程专业的一门专业基础课。考虑到热能工程是一个宽口径的专业,各行各业中使用的燃料多种多样,涉及的燃烧问题十分广泛,为适应各方面的需要,本书着重阐述了固体、液体和气体燃料的燃烧特性以及它们燃烧的基本规律,并在此基础上介绍工程中各种典型的燃烧技术及燃烧设备。内容较为全面,适用性比较广。

全书共分十章。第一章为绪论,主要介绍我国能源的生产与消费以及燃料与燃烧在四个现代化建设中的作用与地位。第二、三章介绍燃料的分类与特性以及燃料燃烧的热工计算。这是学习本书的基础准备。第四、五、六章简要介绍与燃烧过程有密切关系的化学动力学基本知识以及燃烧的基本理论(着火问题、火焰传播问题、火焰稳定问题)。第七章介绍气体燃料的燃烧。着重介绍气体的射流流动、火焰结构及气体燃烧器。第八章介绍液体燃料的燃烧。着重介绍燃油的雾化与雾化装置、油珠的蒸发与燃烧以及液体燃料的燃烧装置。第九章介绍固体燃料的燃烧。着重介绍碳粒的燃烧过程和燃烧规律以及固体燃料的各种燃烧方式和燃烧装置。第十章介绍燃烧引起的污染及控制、减少这些污染的基本方法和途径。书后有附录。在附录中介绍了燃烧物理学基本方程及斯蒂芬流的概念,供参考。

本书第一、九、十章及附录由顾恒祥(西北工业大学)编写。第二章初稿由金如山(北京航空航天大学)编写,修改稿由张坚强(北京航空航天大学)完成。第三、七、八章由张青藩(南京航空学院)编写。第四、五、六章由王洪铭(北京航空航天大学)编写。全书由顾恒祥主编。西北工业大学华光时教授审阅了全书并提出许多宝贵意见,对书稿的完善给予了很大的帮助,在此深表感谢。

由于编者水平有限,书中错误或不妥之处在所难免,请读者批评指正。

编 者

1993年1月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 本课程的重要性和内容	1
§ 1-2 能源概况	2
§ 1-3 能源在国民经济中的地位	3
§ 1-4 燃烧学的发展史及研究方法	7
第二章 燃料	8
§ 2-1 煤	8
§ 2-2 液态燃料	14
§ 2-3 气态燃料	21
第三章 燃烧过程的热工计算	23
§ 3-1 燃料燃烧所需的空气量	23
§ 3-2 完全燃烧产物生成量、成分和密度	26
§ 3-3 不完全燃烧产物及燃烧过程的质量检测	29
§ 3-4 空气消耗系数及运行时的风量调整	32
§ 3-5 燃烧温度计算	34
第四章 燃烧化学动力学基础	44
§ 4-1 化学反应速率	44
§ 4-2 阿累尼乌斯定律	46
§ 4-3 影响反应速率的因素	51
§ 4-4 链锁反应	53
第五章 着火过程	58
§ 5-1 热自燃理论	58
§ 5-2 强迫着火	63
§ 5-3 熄火	67
第六章 火焰传播和火焰稳定	70
§ 6-1 层流火焰传播速度	70
§ 6-2 影响层流火焰传播速度的因素、火焰传播界限及淬熄距离	73
§ 6-3 湍流火焰传播速度	75
§ 6-4 本生灯燃烧过程及其火焰稳定	78
§ 6-5 高速混气流中火焰稳定原理及稳焰方法	80

第七章 气体燃料燃烧	87
§ 7-1 扩散燃烧与动力燃烧	87
§ 7-2 射流流动	88
§ 7-3 扩散火焰结构	99
§ 7-4 预混火焰结构	102
§ 7-5 引射式大气燃烧器	103
§ 7-6 鼓风式燃烧器	113
§ 7-7 燃烧器的适应性	114
§ 7-8 新型气体燃料燃烧器	115
第八章 液体燃料燃烧	119
§ 8-1 液体燃料的燃烧过程	119
§ 8-2 燃油雾化过程	120
§ 8-3 燃油雾化装置——喷嘴	122
§ 8-4 燃油喷嘴的雾化特性	132
§ 8-5 油珠的蒸发与燃烧	136
§ 8-6 油雾燃烧	142
§ 8-7 乳化油及其燃烧	144
§ 8-8 典型液体燃料燃烧装置简介	146
第九章 固体燃料燃烧	150
§ 9-1 煤的燃烧过程	150
§ 9-2 固体碳粒的燃烧	151
§ 9-3 碳粒燃烧的化学反应	155
§ 9-4 多孔性碳粒的燃烧	158
§ 9-5 二次反应对碳粒燃烧的影响	161
§ 9-6 扩散与动力控制的碳粒表面燃烧	164
§ 9-7 灰分对碳燃烧的影响	168
§ 9-8 固体燃料的燃烧方式和燃烧装置	170
§ 9-9 水煤浆燃烧	184
§ 9-10 煤的气化	187
第十章 燃料燃烧引起的污染及其防治	190
§ 10-1 燃料燃烧对空气污染的影响	190
§ 10-2 碳黑与飞灰的形成与防治	192
§ 10-3 硫氧化物的形成与防治	196
§ 10-4 氮氧化物的形成与防治	199
附录 燃烧物理学基本方程	207
§ 1 分子输运基本定律	207

§ 2	基本守恒方程	209
§ 3	二维边界层守恒方程	215
§ 4	泽尔多维奇转换和广义雷诺比拟	216
§ 5	斯蒂芬(Stefan)流	218
参考文献		221

主要符号表

A	燃料中的灰分(百分数)		活性中心销毁速率
	控制体 V 的表面积	H_0	总压
	离心喷嘴几何特性	h	汽化潜热
	面积	i	热焓
a	导温系数	J	物质的扩散流
B	交换数	K	反应速率常数
b	射流半宽度		蒸发常数
c	比热	K'	表观速率常数
C	摩尔浓度		燃烧常数
D	质量扩散系数	K_1	吸附速度常数
d	直径	K_{-1}	解吸速度常数
	比重	K_0	指前因子(反应频率因子)
E	活化能	l	湍流尺度
	电火花放电能量	M_r	相对分子质量
E_v	恩氏粘度	M	摩尔质量
f	质量相对浓度	m	质量流量
	活性中心分枝速率	m_s	吸卷量
	离解度	N	分子总数
G	总物质流量		液滴总数
	液滴燃烧速率	N_A	阿佛加德罗常数
	碳粒燃烧速率	n	反应级数
	实际空气量(质量)		分子数
G^0	理论空气量(质量)		液滴数
g	单位面积上的物质流量		均匀度指数

	切向槽道数	X	} 泽尔多维奇综合参数
O^0	理论氧气量(质量)	Y	
p	压力	x	坐标
p_s	饱和蒸气压		摩尔相对浓度
Q	反应热	y	坐标
	发热量	Z_{AB}	单位体积内每秒钟 A 、 B
	放热量		分子碰撞次数
	散热量	z	坐标
q	热流密度	α	空气消耗系数(空气系数)
q_1	放热率		对流换热系数
q_2	散热率	α_m	雾化锥角
R	通用气体常数	β	化学当量化
	半径		燃料特性系数
	液滴重量(体积)分布		氧化剂中惰性杂质含量
R_s	旋流室半径	r	阿累尼乌斯燃料浓度的指数
r	半径	δ	反应区宽度
S	火焰传播速度		液膜厚度
S_i	单位体积内部孔隙表面积	ϵ	空穴率(有效截面系数)
T	温度		湍流强度
t	时间		氧化剂中氧的含量百分数
u	x 方向速度分量		湍流能量耗散率
V	燃料中的挥发分(百分数)	σ	表面张力
	体积	η	燃烧完全度
V^0	理论空气量(体积)		效率
V_f	容积流量(燃料)	ξ	阻力系数
v	y 方向速度分量	θ	射流边界的半张角
W	燃料中的水分(百分数)		吸附氧的面积分数
	化学反应速率	λ	导热系数
w	z 方向的速度分量	μ	动力粘性系数

	流量系数	g	气相
ν	运动粘性系数	i	着火点
τ	切应力		任一物质
	时间	K	空气
ρ	密度	l	液相
τ_i	感应期		层流
τ_r	混合气在回流区边界停留时间	m	理论
φ	轴向速度系数		轴线上
Σ	求和		平均
Π	求积	O	分界面
Re	雷诺数		初始值
Pr	普朗特数		标准状态
Sc	施密特数	p	燃烧产物
Le	路易斯数	r	燃料
Nu	努塞尔数	S	某种组分
We	韦伯数		表面
	上角标	t	湍流
y	应用基	w	壁面
f	分析基	θ	切向
g	干燥基	∞	来流值
r	可燃基		环境值
	下角标	cr	临界
a	空气	ch	化学
B	着火	DW	低位
b	燃烬	in	进口
$D(d)$	扩散	OPT	最佳
f	燃料	pg	干烟气
	火焰面	ph	物理
		max	最大
		min	最小
		mix	混合

第一章 绪 论

§ 1-1 本课程的重要内容和内容

能源是我国经济和社会发展的战略重点,是实现四个现代化和提高人民生活水平的重要物质基础。近一二十年它的重要性已愈来愈明显地被人们所认识。

能源的种类很多,但在最近几十年,人类能够获得和使用的能源主要是煤炭、石油和天然气。这些燃料需要通过燃烧释放能量,因此燃料的燃烧是目前取得能量的主要方式。它广泛地应用于国民经济的各个部门。研究和掌握燃料的生产及其燃烧过程,把燃料的热能尽可能多地释放出来并加以合理利用,对国民经济的发展和人民生活水平的提高有着巨大的意义。

我国的能源生产 1990 年已经达到 10 亿多吨标准煤*,居世界第三。今后随着四个现代化建设的发展,我国能源的开发与利用还将迅速增长。根据计划,1995 年我国的能源生产将接近 12 亿吨标准煤,2000 年能源生产将超过 13 亿吨标准煤。如此大量的能源开发与利用必然有大量的燃烧工程问题需要解决。举例来说,我国能源的利用现状是很不合理的,能源利用效率低,浪费很大,国民经济的单位产值能耗很高。对于相同的产值,我国消耗的标准煤是世界平均能耗的 2.74 倍。虽然造成这个事实的原因是多方面的,但我国燃烧设备的热效率低则是其重要原因。我国工业锅炉的热效率低达 50~60%,而英国和日本则分别为 71%和 80%。我国窑炉的热效率更低,一般在 30%以下,而其总耗能量约占全国总耗电量的 25%左右。由此可见,我国工业窑炉节能多么重要而又多么艰巨。节能的方法很多,但改进燃烧技术和提高燃烧效率则是一个重要方面。

另一方面,能源的大量开发和利用,会产生大量的有害污染物(烟尘、 NO_x 、 SO_x 、 CO),其中以烧煤造成的大气污染最为突出。我国目前城镇已普遍受到以烟尘和 SO_2 为主的煤烟型物质的污染,大气总悬浮微粒的年日平均值,北方城市达到了 $0.93\text{mg}/\text{m}^3$,南方城市则为 $0.41\text{mg}/\text{m}^3$ 。 SO_2 的年日平均值,北方城市达到了 $0.12\text{mg}/\text{m}^3$,南方城市则为 $0.11\text{mg}/\text{m}^3$ 。如果能源技术和环境控制保持在目前的水平,则能源开发和利用达到 12~13 亿吨标准煤时,北方城市的大气总悬浮微粒将增加至 $1.67\text{mg}/\text{m}^3$ 。超过目前二级环境标准的 4~5 倍。北方城市大气中 SO_2 会增加到 $0.27\text{mg}/\text{m}^3$,将普遍高于 50 年代西方国家一些大城市的水平。由此可知,在国民经济发展与能源利用增长的同时,注意环境保护是刻不容缓的重要问题。在这方面采用先进的耗能方式和燃烧技术可以大大减少能源对环境的污染。

由此可知,燃料及其燃烧过程,在四个现代化建设过程中有着十分重要的作用。如何控制燃烧过程使燃料能高效率、低污染和高强度地燃烧是摆在我们面前需要解决的重大课题。这正是为什么热能、动力以及工程热物理等专业的同学需要学习本课程的原因。

根据以上所述,本课程将对固体、液体和气体燃料的燃料特性以及它们燃烧的基本规律

* 原煤换算成标准煤换算系数为 0.714,原油换算为标准煤换算系数为 1.429。

(燃烧理论)进行讨论,并在此基础上介绍工程中各种典型的燃烧设备和燃烧技术。通过这些内容的学习培养同学分析和解决燃烧工程问题的能力。具体内容可分为以下四部分:

第一部分是燃料及燃料的燃烧反应计算。主要介绍固体、液体和气体燃料的分类和特性以及各类燃料的燃烧反应计算。它包括燃烧需要的空气量、燃烧产物生成量、燃烧温度计算以及燃烧过程质量的检测。

第二部分是燃烧的基本理论。主要介绍燃烧化学动力学基础、预混气的着火理论以及火焰传播速度和燃烧稳定性问题。

第三部分是燃料的燃烧过程、燃烧方法和典型燃烧装置。主要介绍气体燃料、液体燃料和固体燃料的燃烧过程和燃烧规律,介绍工程上实际采用的燃烧方法和一些典型的燃烧装置。

第四部分是燃烧过程引起的污染及其防治。主要介绍燃烧产生的各种污染物及控制和减少这些污染物对大气污染的基本方法和途径。

§ 1-2 能源概况

几千年来人类为了获得能源,一直在同自然界作斗争。从世界范围来看,人类从进入农业社会以后便开始进入能源时代,能源就成为人类社会发展的物质基础。在漫长的农业社会,人类一直用木柴作为能源,此时的生产能力是很低的。18世纪60年代从英国开始的工业革命促使世界能源结构发生了第一次大转变,即从木柴转向煤炭。在整个19世纪煤炭成为资本主义工业化的动力基础,使社会生产力有了很大的提高。到本世纪20年代世界能源发生第二次大转变,即从煤炭转向石油和天然气。这一转变首先在美国出现。二次大战后几乎所有发达国家都转向石油。到1959年石油和天然气在世界能源构成中的比重首次超过煤炭而占第一位。1986年世界一次能源总消费量为108亿吨标准煤,其中:石油占38%;天然气占20%;煤炭占30%;水电占7%;核电占5%。能源结构从煤炭转向油、气,对社会和经济的发展具有十分重要的意义。50年代和60年代许多国家正是依靠充足的石油供应,特别是廉价的中东石油实现了经济的高速增长。70年代以来,由于现有能源的资源有限(据估计目前全世界已探明的煤炭、石油、天然气等化石燃料的总量大约只够人类使用100多年),更重要的是新的技术革命的兴起,促使新兴工业(电子和电脑工业、空间工业、海洋和生物工程等)的蓬勃发展,将使世界能源结构经历第三次大转变,即从油、气为主的能源系统转向可再生的、分散的和多样化的能源。这个转变将是一个漫长的过程,大约需要经历100年或更多的时间。因而在未来的几十年内,世界能源仍将以化石燃料为主,并且煤炭将重新成为世界的主要能源。

据国际应用系统分析研究所预测,到2030年世界一次能源的构成是:煤29~34%,石油22~19%,天然气15~17%,核能23%,水力和地热7~4%,太阳能和其他可再生能源4%,2030年全世界生产的煤炭将有一半以上用来制取合成燃料。

我国的能源资源是丰富的。煤的探明储量已达8000亿吨以上(占世界第一位)。水力资源达 $6.8 \times 10^8 \text{ kW}$ (占世界第一)。石油的总资源量约为787亿吨,目前已探明的石油储量只是其中很小的一部分。天然气储量达 $4 \times 10^{13} \text{ m}^3$,铀钍资源相当丰富。因此从长远来看我国能源资源不应成为限制能源生产和供应的主要障碍。

新中国成立40多年来,我国的能源工业得到了迅速的发展。1990年我国煤的产量已达10.9亿吨,原油产量达到了1.38亿吨,发电量达到5500亿度(6150亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$)。与解放初期

相比煤的产量增加了 33 倍,原油产量增加 1 100 多倍,发电量增加 140 多倍,其增长速度超过了国民经济的增长速度,基本上满足了国内的需要并且还略有出口。目前我国已成为世界第三大能源生产国了。

我国在能源生产迅速增长的同时能源结构也发生了显著的变化。建国初期能源生产基本上是单一的煤炭结构,在 50 年代煤炭占一次能源总产量的 95% 以上。1963 年以后随着大庆、胜利、华北、大港油田的建成投产,煤炭在能源构成中的比重开始下降,石油的比重逐渐上升。目前我国的能源生产结构已经从基本上是单一的煤炭结构发展为以煤炭为主(约占 71.2%),石油、天然气(约占 24.3%)和水电(约占 4.5%)互补的多种能源结构。这对于促进我国经济和社会的发展具有重要意义。

需要指出,我国作为一个拥有 11 亿人口的发展中国家,依靠自己的力量和丰富的资源实现能源自给是一项巨大的成就。在当今能源问题日益尖锐的世界上,这一成就对保证国家的独立和经济的增长具有深远的意义。

我国是能源生产大国,也是能源消费大国。1986 年我国一次能源的总消费量为 8.09×10^8 吨标准煤,仅次于美国、苏联而居世界第三位。在能源消费总量中工业消费约占 2/3,农业占 7%,民用和商业占 26.7%。在工业部门中化工冶金和建材是耗能最多的部门。

虽然我国是能源生产和消费大国,但是若按人口平均的消费量计算,我国的水平是很低的。据 1986 年统计我国人均能源消费量只有 0.76 吨标准煤,远低于发达国家的水平,是世界平均值的 1/3。

另一方面我国能源的利用效率也很低。以每吨标准煤能耗创造的产值来计算,1980 年世界平均产值为 1 190 美元,我国只有 435 美元,为世界平均值的 36.5%。若以每千美元产值的能耗来比较,世界平均能耗为 0.84 吨标准煤,而我国则为 2.3 吨标准煤,为世界平均能耗的 2.74 倍。从单位产品能耗看,我国与世界先进水平相比也存在很大差距。某些高能耗产品,生产每吨产品消耗的能源普遍比国外先进水平高出 1 倍左右。这说明我国能源利用技术比较落后,每吨能源所提供的有效能在主要耗能行业中只及国外先进水平的一半左右。因此我国有着巨大的节能潜力。

根据 1980 年我国能流图计算,我国能源的综合利用效率只有 25.86%。各种能源在各部门的有效使用情况如图 1-1 所示。近 10 年来能源利用效率有了提高,但一般估计仍不超过 30%。欧洲地区在 70 年代初能源的综合利用效率为 32%,日本为 36.5%,目前工业发达国家的能源有效利用已超过 40%。相比之下我国每年要白白多消费 2 亿多吨的煤。因此为了满足我国日益发展的生产和人民生活日益提高的需要,我们一方面必须大力增加能源生产,另一方面也必须大力开展节能工作。所以我国能源建设的总方针是“能源的开发和节约并重,在近期要把节能放在优先地位”,这无疑是十分正确的。

§ 1-3 能源在国民经济中的地位

在现代社会中,任何生产过程不投入必要的能源,生产过程是无法进行的。因此能源在国民经济中有着十分重要的地位。从根本上说经济的发展要以能源作为物质基础。对于一个正在实行经济结构工业化、经济建设现代化的国家,只有能源生产增加经济才能发展。我国建国以来国民经济发展与能源增长的关系(图 1-2)充分说明了这点。然而能源与经济的关系是复

杂的,在一个国家不同的发展阶段能源对经济的影响程度是不同的。一般来说社会经济的发展要经历三个阶段,即劳动密集阶段——能源密集阶段——技术密集阶段。以美国为例,1840~1900年为劳动密集阶段,1900~1960年为能源密集阶段,1960~2020年为技术密集阶段。这三个阶段的社会经济结构有很大的差异,因此经济对能源的依赖程度也不相同。

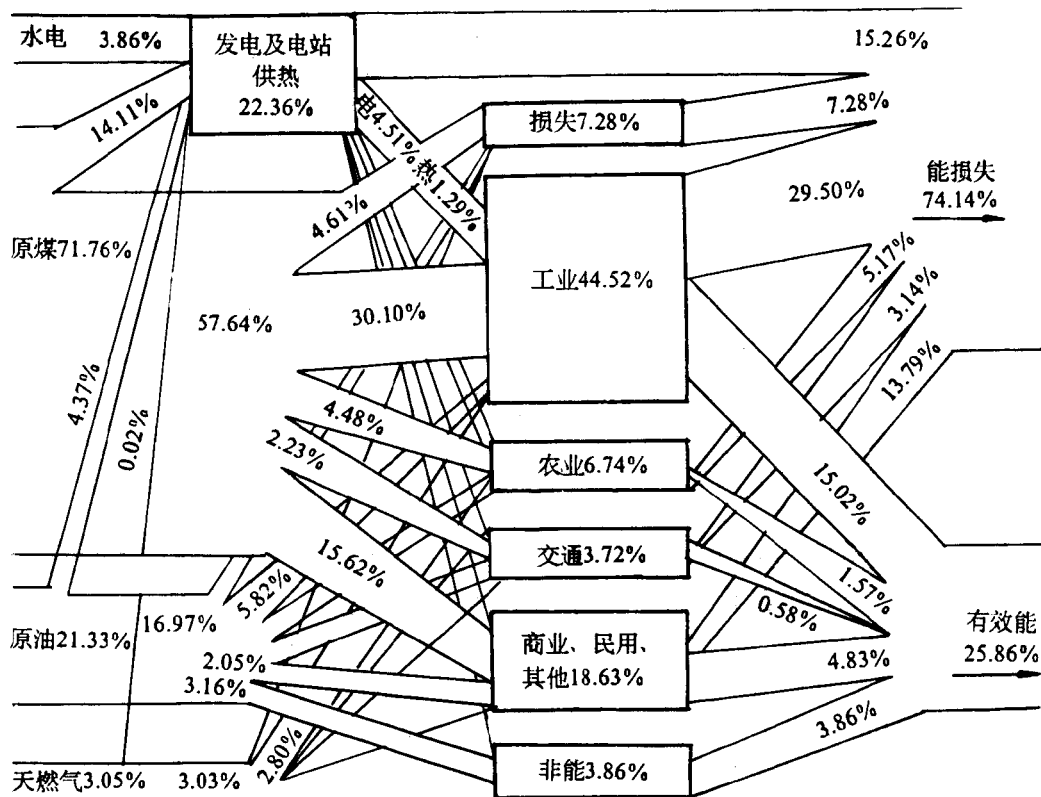


图 1-1 中国 1980 年能流图

能源消费与经济增长之间的关系可以用能源弹性系数来表示,亦即用一次能源的年增长率与国民生产总值年增长率的比值来表示。这一宏观指标能够反映能源与经济发展的长期趋势。一般在工业化初期能源消费对经济的增长敏感性大,能源弹性系数应大于1。实现工业化后,工业在产值中所占比重下降而耗能少的服务业的比重上升,同时能源利用效率提高。这些因素可使能源弹性系数降到1以下。发达国家和发展中国家能源与经济增长的一般关系如表 1-1 所示。

因为生产任何产品都离不开能源,所以一个国家的能源发展水平在一定程度上代表了国家的经济发展水平。图 1-3 示出了各工业国一次能源消耗与国民产值的关系。图 1-4 统计了 85 个发展中国家人均年产值与人均年耗能的关系曲线。由图可知,两者关系相当密切,且呈单调关系。这些曲线说明,如果没有足够的能耗和人均能耗水平,想达到很强的经济实力和很高的人均国民生产总值是不可能的。

表 1-1 1950~2030 年发达国家和发展中国家能源弹性系数

	1950~1975 年	1976~2000 年	2001~2030 年
发达国家			
一次能源年增长率%	4.5	2.2~2.9	1.6~2.0
经济年增长率%	4.8	2.8~3.8	1.8~2.5
能源弹性系数	0.94	0.79~0.76	0.89~0.80
发展中国家			
一次能源年增长率%	8.6	4.4~5.9	2.9~4.0
经济年增长率%	6.0	3.6~5.2	2.6~3.6
能源弹性系数	1.43	1.22~1.13	1.12~1.11

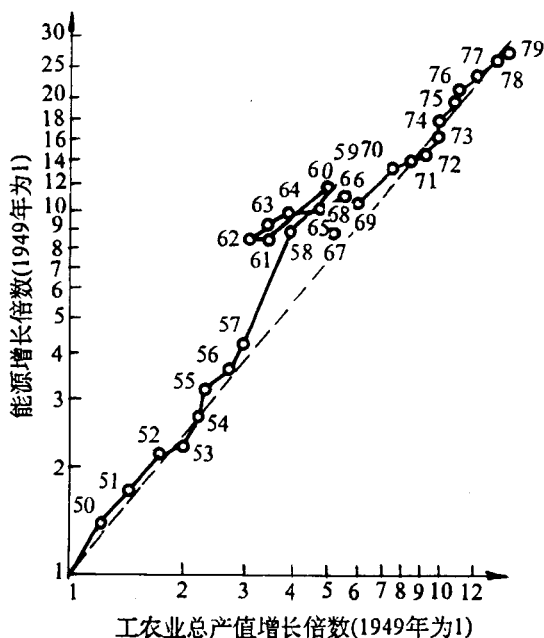


图 1-2 我国历年能源消耗和工农业总产值相对值的变迁(虚线表示平均弹性系数 $\tau=1.27$)

生产水平的提高,经济实力的增长,在一般情况下,国民的平均生活水平会得到相应的提高,它体现了生产能源的最终目的。因此目前已把人均产值和人均能耗作为衡量一个国家国民经济发展情况和人民生活水平高低的重要标志了。由此可知,能源的生产和消费是和人们生活质量的高低密切相关的。根据国内外专家的预测,在现代社会中生活质量要达到小康生活水平需要的人均年耗能量大约在 1.2~1.6 吨标准煤之间。能源需求的具体情况如表 1-2 所示。

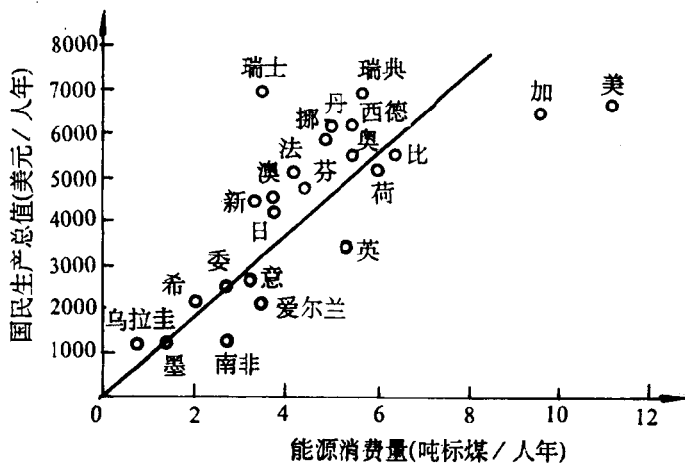


图 1-3 工业国国内总产值与一次能源消耗的关系

表 1-2 小康生活的能源需求

单位 kg 标准煤/人年

项目	中国能源研究会预测	哈夫纳的研究结果
衣	70~80	108
食	300~320	323
住	320~340	323
行	100~120	215
其他	440~460	646
总计	1 230~1 320	1 615

我国目前正在进行四个现代化的建设,要在 2000 年实现国民生产总值比 1980 年翻两番,人民生活达到小康水平的目标,必须有足够的能源来保证。1980 年我国能源消费总量为 6 亿吨标准煤。到本世纪末国民生产总值翻两番,能源消费量必须有相应的增长。根据预测大约需要(16~17)亿吨标准煤。按照到本世纪末我国人口为 12 亿计算,则人均能源消费量为(1.3~1.4)吨标准煤。这个数字大致与国内外学者得出的小康生活对能源需求的估计相符合。需要指出,到 2000 年我国要生产(16~17)亿吨标准煤是我国能源工业很难达到的。根据计划到本世纪末我国的能源生产约可达到(13~14)

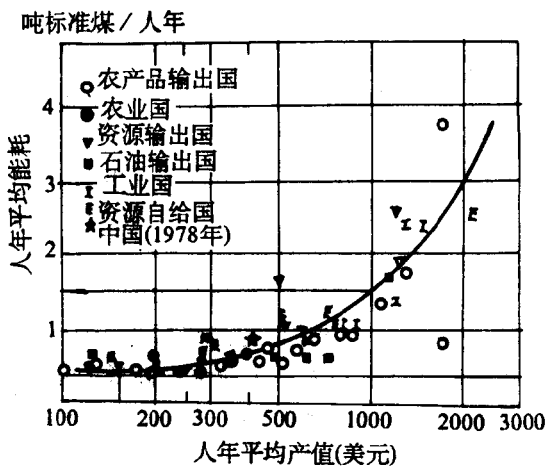


图 1-4 85 个发展中国家人均国民生产总值与人均能耗的关系

亿吨标准煤。这样缺少的几亿吨煤必须依靠节能工作来实现。因此节能是关系到四个现代化建设能否按计划实现的关键之一。这就是说我们必须依靠经济结构的调整、科学的管理和技术的进步来大大降低我国单位产品或单位产值的能耗水平,才能满足四个现代化建设的需要。在这方面燃料的合理使用,燃烧过程的良好组织,采用先进的燃烧技术和燃烧设备以及保证燃烧设备的良好运行可以发挥巨大的作用。

§ 1-4 燃烧学的发展史及研究方法

燃烧是一门古老而又年青的科学,说它古老是因为人类在几千年甚至几万年以前就已经知道火的应用了。说它年青是因为对燃烧本质和燃烧规律的认识,只是在最近一二百年特别是最近几十年才有了较大的发展。目前燃烧的应用已经遍及动力、冶金、石油、化工、交通运输、机械制造、纺织、造纸、食品、国防以及人民生活的各个领域。可以说现代社会的物质文明和精神文明是与燃烧技术的发展密切相关的。

虽然人类学会用火已有很长的历史,但由于燃烧的复杂性,对火的认识却长期处于无知状态,把物质能否燃烧归之于物质中是否含有一种“燃素”。直到18世纪中 Ломоносов 和 Lavoisier 才提出了燃烧是物质氧化的正确概念。19世纪中 Hess, Kirchoff 发展了热化学和化学热力学,把燃烧作为热力学体系来研究。阐明了燃烧热、燃烧产物和燃烧温度的有关规律,形成了燃烧静力学。20世纪30年代开始建立燃烧动态过程的理论,由 B. Lewis, Von Elbe, H. H. Семёнов 等人根据反应动力学及传热传质的观点,建立了着火和火焰传播的经典燃烧理论。在40~50年代, Варцавский, Spalding, Хитрин, Hottel 等人从扩散燃烧和扩散动力燃烧的观点研究了液滴和碳粒的燃烧。从50年代末到60年代, Vonkarman 首先提出用连续介质力学来研究燃烧,形成了后来称之为“化学流体力学”的分支。70年代随着大型电子计算机的出现, D. B. Spalding, S. V. Patankar, J. Swithenbank, L. D. Smoot 等人把计算流体力学的方法用于研究燃烧,建立了“计算燃烧学”。目前计算燃烧学已广泛应用于气体燃料燃烧、液雾燃烧、煤粉燃烧的研究,并取得了进展。与此同时激光诊断技术的发展,使人们有可能用非接触的方法,直接测量燃烧条件下的气流速度、温度、组分浓度以及颗粒速度、浓度和尺寸分布,使人们对燃烧机理的了解不断深入。

由此可知,目前已经可以用多种技术手段来进行燃烧学的研究。可以预料,运用基本燃烧理论、燃烧问题的数学模型和激光诊断技术,将大大推进人们对复杂燃烧现象的认识并使燃烧技术得到进一步发展,使燃烧科学能更好和更有效地为工程设计、产品研制和产品使用服务,以满足国民经济发展和四个现代化建设的需要。

思 考 题

1. 我国能源生产和消费的概况和特点。
2. 能源在国民经济建设和提高人民生活水平中的重要性。
3. 本课程在专业中的作用和地位。

第二章 燃 料

本章主要讨论碳氢燃料,包括固态燃料(煤)、液态燃料(煤油、重油)、气态燃料(天然气、煤气)。

§ 2-1 煤

煤是我国主要的能源燃料,包括工业上用煤和民用煤。以煤代油是我国的一项能源政策。本节将讨论煤的生成、种类、化学组成、使用性质、煤水浆以及煤的气化。

一、煤的种类及化学组成

煤是棕色至黑色的可燃烧的类似岩石的固体。它由植物经过物理和化学的演变和沉积而成。最初这些植物的沉积常常是在沼泽地或潮湿的环境中进行,并逐渐腐烂风化形成泥浆或泥煤。泥煤就是煤的前身,泥煤经过埋藏沉积以及随后的地质过程,包括压力及温度增高,演变成煤。在煤化过程的不同阶段,除泥煤外,煤可分为褐煤、烟煤(包括高、中、低挥发分)以及无烟煤(包括半无烟煤、无烟煤、高碳化无烟煤或石墨煤)。

(1)泥煤是最年青的煤,也是由植物刚刚变过来的煤。在结构上它还保留有植物遗体的痕迹,质地疏松,吸水性强,含天然水分高达40%以上,需进行露天干燥。风干后体积密度为 $300 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ 。在化学组成上与其他煤种相比,泥煤含氧量最高,达28~30%,含碳量较低。使用上泥煤挥发分高,可燃性好,反应性高。它含硫低,机械性差,灰分熔点很低。工业上泥煤用于烧锅炉和作气化原料,但其工业价值不大,不能长途运输,只能作地方性燃料使用。

(2)褐煤是泥煤经过进一步变化后生成的,由于能将热碱水染成褐色而得名。它在性质上与泥煤有很大的不同,它的密度较泥煤大,体积密度 $750 \sim 800 \text{ kg/m}^3$ 。含碳量较高,氢和氧含量较少,挥发性相对泥煤来说低些。使用上粘结性弱,极易氧化和自燃,吸水性较强。在空气中易风化和破碎,只能作地方性燃料。

(3)烟煤是一种煤化程度较高的煤种,与褐煤相比,挥发分较少,密度较大,吸水性较小,含碳量增加,氢和氧的含量较低。烟煤是工业上的主要燃料,也是化学工业的重要原料。烟煤的最大特点是具有粘结性,这是其他固体燃料所没有的,因此是炼焦的主要原料。当然对炼焦的煤要有一定的选择,并非所有的烟煤都具有粘结性,也不是所有有粘结性的煤都适合于炼焦。我国根据煤的粘结性及挥发性大小等物理化学性质进一步把煤分为长烟煤、气煤、肥煤、结焦煤、瘦煤等不同的品种。其中长烟煤和气煤挥发分含量高,容易燃烧和适合于制造煤气。结焦煤具有良好的结焦性,适合于生产冶金焦炭。

(4)无烟煤是矿物化程度最高的煤,也是年龄最老的煤,其特点是密度大,含碳量高,挥发分极少,组织密实、坚硬、吸水性小,适合于长途运输、长期贮存。其缺点是可燃性差,不易着火,但发热量大(约 $29 \sim 300 \text{ kJ/kg}$),灰分少,含硫低,分布广。无烟煤也是很重要的燃料。

煤是由极其复杂的有机化合物组成的。由元素分析,主要的可燃元素是碳,其次是氢,并含

有少量的氧、硫、氮等元素。这些元素构成可燃化合物,称为可燃质。此外,煤中都含有水分(W)和灰分(A),这些是不可燃的,称为煤的惰性质。一般由煤的C、H、O、N、S各元素的分析值及水分、灰分的百分含量来表达煤的化学组成。

碳是主要的可燃元素。煤的煤化程度越高,含碳量越大。煤的可燃质中含碳量大致如下:

泥煤	C: ~70%
褐煤	C: 70~78%
弱粘结性煤	C: 80~83%
粘结煤	C: 83~85%
强粘结性煤	C: 83~90%
无烟煤	C: 90%以上

氢也是煤的主要可燃元素,在可燃质中含碳量为85%时,有效氢含量最高,约5%。在此之后氢含量又随煤化程度提高而减少。在煤中氢以两种形式存在,与碳、硫结合在一起的,叫做可燃氢,它可以有效地放出热量。另一种是和氧结合在一起的,叫化合氢,它不能放出热量。在计算发热量和理论空气需要量时,以有效氢为准。

氧在煤中是一种有害物质,氧和碳、氢等结合生成氧化物而使碳、氢失去燃烧的可能性。可燃物质中碳含量越高,氧含量越少。

氮一般不能参加燃烧,但在高温燃烧区中氮和氧形成 NO_x 是一种排气污染物,煤中含氮约0.5~2%。

硫在煤中有三种存在形式:

- (1)有机硫,来自母体植物,与煤呈化合态均匀分布;
- (2)黄铁矿硫,以 FeS_2 形式存在;
- (3)硫酸盐硫,以 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 FeSO_4 等形式存在于灰分中。

硫是燃料中一种极为有害的物质,硫燃烧后生成 SO_2 、 SO_3 ,它危害人体,污染大气并可形成酸雨。在锅炉中会引起锅炉换热面的腐蚀。发电厂排气中含硫化物,过去一般并不除去,从环境保护考虑应加除硫装置,这会使发电厂的设备费用增加20%左右。所以煤中的硫是合理干净地使用煤的大问题。

灰分是指煤中所含矿物质(硫酸盐、粘土矿物质及稀土元素)在燃烧过程中高温分解和氧化后生成的固体残留物。大体上灰分的成分为 SiO_2 : 40~60%; Al_2O_3 : 15~35%; Fe_2O_3 : 5~25%; CaO : 1~1.5%; MgO : 0.5~8%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$: 1~4%。煤中灰分是一种有害成分。对工业锅炉来说,灰分高的煤热值低,不好烧,给设备维护带来困难。对今后燃气轮机用煤,更是要要求灰分非常低。灰分给涡轮叶片带来腐蚀、沉积、浸蚀。现在国际上已经研究出可将煤中灰分精洗到1%以下供燃气轮机使用。但价格很贵,难以工业化。煤中的灰分可分为两种:一种是煤化过程中由土壤等外界带入的矿物质,称为外来灰分。这种灰分可以用浮选等物理选矿方法来清除。一般工业用的洗净煤含灰量在8%左右。特别仔细的物理洗煤技术可将煤中灰分洗到3%左右。再要降低灰分就得用化学方法了。另一种灰分是原来成煤植物中固有的,称之为内灰分。减少内灰分必须将煤磨细后,用化学液体(如氢氟酸)去与灰分作用,然后再用碱液洗掉酸,最后用水洗。这一过程成本昂贵,对环境污染严重。

在工业上解决灰分的方法大体是:①在入炉前减少煤中灰分,采用洗煤。除了燃气轮机要求非常高外,炼焦用煤规定入炉前煤中灰分不超过10%。②在燃烧过程中排渣(液体排渣)或