

# 节能原理与技术

陈昕宽 编

机械工业出版社

## 前 言

能源是国民经济发展的动力，是实现四个现代化和提高人民生活水平的物质基础。建国以来，我国能源工业迅速发展，取得了很大成绩。但是随着我国工农业生产的发展，能源开发速度还不能满足国民经济发展的要求，因此我国制定了能源开发和节约并重、近期把节能放在优先地位的方针，为解决我国能源问题指明了方向。最近几年，我国在这一方针指引下，在能源开发和节能两个方面均取得了显著成绩。在“六五”计划期内，我国一次能源产量由6.2亿t标准煤增加到8.25亿t标准煤，增长了33%；同时大力开展节能工作，五年内总节能量达1.2亿t标准煤，使我国万元工业产值的能耗由8.18t标准煤降到6t标准煤。成绩十分显著，令人鼓舞。

今后，节能工作仍然十分重要，根据“七五”和到2000年的规划，我国工业产值增长所需要的能源，其中一半要靠节能来保证。预计到本世纪末，我国万元工业产值的能耗要降到3.81t标准煤，任务十分艰巨。随着节能工作的深入，节能的难度越来越大，节能初期依靠调整经济结构和简易节能措施形成的节能效果将越来越少，今后的节能将主要依靠科学技术的进步来完成，因此必须下更大的功夫。

节能就是提高能源的利用率。本书首先从热力学理论出发，阐述了与节能密切有关的热力学基本原理，接着阐述了能量平衡方法，然后分别论述了热力系统的节能原理，包括热电联合生产和蒸汽燃气联合循环动力装置；煤炭利用的发展方向——煤的气化；有巨大节能潜力的余热利用及其设备，包括余热锅炉、换热器、热管换热器、热泵和蓄热器等。本书着重阐述与节能有关的基本理论及其应用，密切联系实际，推广节能新技术。本书尽力反映国内在节能方面所取得的成果，同时注意汲取国外在节能方面的先进经验、反映国外科学技术的新成果。作者努力使本书成为一本较有系统的论述节能原理和技术的完整的学科性著作，使其可作为高等院校能源类专业的教材，也可作为各部门进行节能技术培训的培训教材，同时可供从事节能工作的广大工程技术人员和大专院校师生参考。

温龙副教授为本书编写了煤的气化一章中的§6-1到§6-3。在本书编写过程中，西安交通大学多相流与传热研究室、锅炉教研室等许多同志为本书提供了许多资料和建议，书中引用了不少单位的资料和经验，在此一并向为本书提供过帮助的同志致以谢意。

由于本书述及面广，作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者不吝指正。

陈听宽教授

于西安交通大学 1987年3月

## 符号说明

- A** 面积,  $m^2$ ; 焓,  $kJ$  (面积,  $m^2$ 表示面积的单位为 $m^2$ , 余同)
- a** 导温系数,  $m^2/s$ ; 比焓,  $kJ/kg$ ; 黑度; 灰渣比; 磨损性系数
- B** 燃料量,  $kg/h$
- b** 煤耗率,  $kg/(kW \cdot h)$
- C** 比热容,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ 或 $kJ/(kg \cdot K)$ ; 速度,  $m/s$
- D** 蒸汽量,  $kg/h$ ; 直径,  $m$
- d** 直径,  $m$ ; 空气含水量,  $g/kg$
- E** 焓,  $kJ$ ; 肋片有效系数
- e** 比焓,  $kJ/kg$
- F** 力,  $N$ ; 面积,  $m^2$ ; 流通面积,  $m^2$
- G** 质量流量,  $kg/h$
- g** 重力加速度,  $m/s^2$
- H** 高度,  $m$ ; 受热面积,  $m^2$ ; 反应热,  $kJ/kg$
- h** 高度,  $m$
- I**  $1kg$ 燃料烟气或空气的焓,  $kJ/kg$ ; 投资费, 元
- i** 工质焓,  $kJ/kg$ ; 贷款年息
- K** 传热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 或 $W/(m^2 \cdot K)$ ; 平衡常数; 运行维修费, 元
- k** 绝热指数; 辐射减弱系数,  $1/(m \cdot 10^5 Pa)$ ; 反应速度常数,  $s^{-1}$ 或 $1/s$   
长度,  $m$
- M** 相对分子量; 反应物质量,  $kg/h$ ; 净收益, 元
- m** 质量,  $kg$ ; 金属抗磨系数
- N** 功率,  $kW$
- Nu** 努塞特数
- n** 雾化蒸汽量,  $kg/kg$ ; 管子数
- P** 功率,  $kW$
- Pr** 普朗特数
- p** 压力,  $Pa$
- Q** 热量,  $kJ$ ; 燃料发热量,  $kJ/kg$ ; 热损失,  $kJ$
- q** 比热量,  $kJ/kg$ ; 热流密度,  $kW/m^2$ ; 热损失率
- R** 气体常数,  $kJ/(kg \cdot K)$ ; 反应能力指标; 曲率半径,  $m$
- Re** 雷诺数
- r** 汽化潜热,  $kJ/kg$ ; 补燃比; 烟气中气体的容积  
份额
- S** 焓,  $kJ/K$ ; 压头,  $Pa$
- s** 比焓,  $kJ/(kg \cdot K)$ 或 $kJ/(mol \cdot K)$ ; 节距,  $m$ ; 有效辐射层厚度,  $m$
- T** 热力学温度,  $K$
- t** 工质温度,  $^\circ C$
- U** 周界长度,  $m$
- u** 速度,  $m/s$ ; 内能,  $kJ/kg$
- V** 容积,  $m^3$ ; 标态烟气流,  $m^3/s$ ; 年产值, 元
- v** 比容,  $m^3/kg$
- W** 功,  $kJ$ ; 燃料中水分含量,  $\%$
- w** 比功,  $kJ/kg$ ; 流速,  $m/s$ ; 蒸汽湿度,  $\%$
- x** 含汽率
- Z** 碳转化为甲烷的份额
- z** 高度,  $m$
- a** 过量空气系数; 热化系数; 放热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- $\beta$**  不均匀系数
- $\Delta$**  差值
- $\delta$**  厚度,  $m$ ; 磨损量,  $mm$
- $\varepsilon$**  制冷系数; 压缩比; 污染系数,  $m^2 \cdot ^\circ C/W$
- $\zeta$**  焓损率; 热力系数; 阻力系数
- $\eta$**  效率,  $\%$
- $\theta$**  烟气温度,  $^\circ C$
- $\lambda$**  导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ; 摩擦阻力系数
- $\mu$**  烟气中飞灰浓度,  $kg/kg$ ; 动力粘度,  $Pa \cdot s$
- $\nu$**  运动粘度,  $m^2/s$
- $\xi$**  热利用系数
- $\pi$**  增压比
- $\rho$**  密度,  $kg/m^3$ ; 预燃比
- $\Sigma$**  总和
- $\sigma_0$**  黑体辐射常数,  $W/(m^2 \cdot K^4)$
- $\tau$**  时间,  $s$
- $\Phi$**  修正系数; 热流量,  $W$
- $\Psi$**  制热系数
- $\psi$**  热有效系数; 含湿率

## 角 码 说 明

i	进口; 饱和水	jz	结渣
o	出口; 饱和蒸汽	k	空气; 空间
o	理论; 基准; 环境	kc	空气带出
max	最大	kr	空气带入
min	最小	kw	空气物理热
B	布雷顿	l	肋; 冷; 流体; 炉膛
b	壁; 泵	lb	炉壁
hh	饱和	ld	炉底; 流动
C	卡诺; 出; 抽汽	lk	冷空气
Cr	传热	lm	漏煤
D	笛塞尔	ly	利用
d	电; 对流; 大	m	煤
dj	当量	N	标准状态
dq	大气	n	内; 凝汽式;
dsw	低位	nd	凝汽式电厂
e	额定	ns	凝结水
f	辐射	O	奥托
fh	飞灰	pc	排出
fs	辐射	pj	平均
g	高; 钢; 干燥基	ps	排污水
gd	管道	py	排烟
gg	供给	q	蒸汽; 气体
gk	干空气	qh	欠焓
gl	锅炉; 孤立	qi	汽轮机
gs	给水; 管束	qn	汽轮机内效率
gsw	高位; 高温; 干物	qr	全入
gy	干烟气; 工艺	qt	其它
h	灰; 汽水混合物	R	朗肯
hb	化学不完全	r	热; 入; 燃料
hj	化学反应放热	rh	燃料化学热
hs	耗散; 回收	rq	可燃气体
hx	化学反应吸热	rw	燃料物理热; 热网
hz	灰渣	S	斯特林
j	金属; 计算	sa	水; 散; 产
jb	机械不完全	sc	输出; 水带出
jh	积灰	sd	送电; 输电
ji	进口	sg	水垢
jl	节流	sh	上升管
js	净入; 绝热	sj	实际
js	界限	sl	水冷

sq 水蒸汽  
 sr 输入; 收入; 散热  
 ss 损失  
 sc 其它支出  
 sr 其它收入  
 tz 停滞  
 w 物料; 外  
 wc 物料带出  
 wr 物料带入  
 x 蓄; 小  
 xh 消耗

xj 下降管  
 xs 吸水; 蓄散; 吸入  
 xt 系统  
 y 烟; 烟气; 药液; 应用基  
 yc 引出  
 yq 逸气  
 yx 有效  
 z 自用; 蒸汽; 蒸煮; 渣  
 zc 支出  
 zf 蒸发  
 zs 折算

# 目 录

## 符号说明

第一章 总论 .....	1
§ 1-1 能源在国民经济中的重要性 .....	1
§ 1-2 能源分类和利用 .....	3
§ 1-3 能源资源与消费 .....	6
一、世界能源概况 .....	6
二、我国能源概况 .....	9
§ 1-4 能源计量单位 .....	10
§ 1-5 节能潜力及意义 .....	12
第二章 参考文献 .....	14
第二章 热力学基本原理 .....	15
§ 2-1 热力学基本概念 .....	15
一、热力系统 .....	15
二、热力系统状态参数 .....	15
三、热力过程 .....	17
四、热力循环 .....	22
§ 2-2 热力学第一定律 .....	30
一、封闭系统能量平衡方程式 .....	31
二、开口系统能量平衡方程式 .....	31
三、能量平衡方程式的应用 .....	31
§ 2-3 热力学第二定律 .....	33
一、热力学第二定律的几种表述 .....	33
二、卡诺定理 .....	34
三、熵增原理 .....	34
§ 2-4 焓 .....	36
一、焓的基本概念 .....	36
二、热力系统焓的计算 .....	36
三、理想气体的焓 .....	38
四、燃料焓 .....	39
五、化学反应焓 .....	40
第二章 参考文献 .....	41
第三章 能量平衡 .....	42
§ 3-1 概述 .....	42
§ 3-2 热平衡 .....	42
一、热平衡模型和方法 .....	43
二、热平衡技术指标 .....	46
三、燃料发热量与等价热量 .....	50

§ 3-3 设备热平衡 .....	51
一、锅炉 .....	51
二、工业炉窑 .....	56
三、用汽设备 .....	62
§ 3-4 企业热平衡 .....	69
§ 3-5 焓平衡 .....	70
一、焓平衡基本概念 .....	70
二、焓效率 .....	71
第三章 参考文献 .....	72
第四章 热电联合生产 .....	73
§ 4-1 热电联产经济性分析 .....	73
一、热电联产的发展 .....	73
二、热电联产总热耗分配 .....	75
三、热电联产集中供热节能效益 .....	78
四、热电联产焓分析 .....	81
§ 4-2 大型热电厂建设 .....	82
一、供热机组型式的选择 .....	82
二、影响热电厂节能的主要因素 .....	86
§ 4-3 凝汽式电厂改造供热 .....	88
一、冷凝器低真空运行 .....	88
二、抽汽供热 .....	89
§ 4-4 企业自备中小型热电厂 .....	90
§ 4-5 裕压发电 .....	92
§ 4-6 区域锅炉房集中供热 .....	95
一、供热介质 .....	96
二、供热参数 .....	98
三、热水锅炉 .....	100
第四章 参考文献 .....	102
第五章 蒸汽燃气联合循环动力装置 .....	103
§ 5-1 联合装置的类型 .....	103
一、排气加热给水联合循环 .....	103
二、余热锅炉联合循环 .....	103
三、排气补燃联合循环 .....	106
四、排气再燃联合循环 .....	106
五、正压锅炉联合循环 .....	108
§ 5-2 煤气化联合循环装置 .....	110
一、煤气化联合循环方案比较 .....	110

二、联邦德国鲁奇—斯蒂克联合 循环装置.....	112	二、高温产品和炉渣的余热.....	179
三、美国联合循环装置的发展.....	113	三、冷却介质的余热.....	180
四、煤气化炉.....	115	四、化学反应余热.....	180
五、煤气净化.....	117	五、可燃废气、废液、废料的余热.....	180
六、燃气轮机技术.....	120	六、废汽、废水的余热.....	180
§ 5-3 沸腾燃烧联合循环装置 .....	121	§ 7-2 余热计算 .....	181
一、常压沸腾炉联合循环.....	122	一、烟气余热计算.....	181
二、增压沸腾炉联合循环.....	123	二、高温产品和炉渣余热计算.....	182
§ 5-4 磁流体—蒸汽动力联合循环 .....	126	三、冷却介质余热计算.....	183
第五章 参考文献.....	128	四、可燃废气余热计算.....	183
第六章 煤的气化 .....	129	§ 7-3. 余热利用方式 .....	184
§ 6-1 煤的气化的经济意义 .....	129	一、蒸汽动力循环.....	184
一、概述.....	129	二、双压蒸汽循环.....	187
二、煤气工业在经济建设中的作用.....	129	三、低沸点有机工质循环.....	189
三、煤气工业的经济性.....	130	四、热利用.....	194
§ 6-2 煤的气化技术 .....	133	五、余热制冷.....	195
一、煤气的种类.....	133	§ 7-4 工业炉窑余热利用 .....	197
二、气化方法概述.....	134	一、炼钢平炉余热利用.....	197
三、气化原理.....	137	二、炼钢转炉余热利用.....	199
§ 6-3 气化技术的发展 .....	144	三、有色金属余热利用.....	201
一、加压鲁奇炉.....	144	四、干法熄焦余热利用.....	204
二、Hygas煤气化法 .....	148	五、化铁炉余热利用.....	205
三、Hydrane煤气化法.....	151	六、加热炉余热利用.....	207
四、Bigas煤气化法 .....	154	七、玻璃熔窑余热利用.....	209
五、CO <sub>2</sub> 接收剂煤气化法 .....	156	八、干法水泥窑余热利用.....	209
六、凯洛格熔盐煤气化法.....	158	九、其它方面余热利用.....	211
七、Cogas煤气化法 .....	159	§ 7-5 石油化工余热利用 .....	211
八、Synthane煤气化法 .....	161	一、合成氨余热利用.....	212
九、U-gas煤气化法 .....	162	二、乙烯装置余热利用.....	216
十、美国燃烧公司的挟带床气化炉.....	164	三、炼油厂余热利用.....	219
十一、地下煤气化.....	165	四、硫酸厂余热利用.....	221
十二、核热煤气化法.....	167	五、甲醛生产余热利用.....	224
§ 6-4 简易煤气炉 .....	170	六、炭黑生产余热利用.....	225
一、简易煤气锅炉.....	170	§ 7-6 余热利用经济性分析 .....	225
二、简易煤气加热炉.....	172	一、使用期净收益法.....	225
§ 6-5 煤的液化 .....	173	二、投资偿还年限法.....	225
一、直接液化.....	174	三、投资利润率法.....	226
二、间接液化.....	175	第七章 参考文献.....	226
第六章 参考文献.....	177	第八章 余热锅炉 .....	227
第七章 余热利用 .....	178	§ 8-1 余热锅炉的作用, 特点与分类 .....	227
§ 7-1 余热资源 .....	178	§ 8-2 余热锅炉烟气条件对锅炉 结构的影响 .....	229
一、排气余热.....	178	一、含尘气流.....	229

二、 粘结性气流.....	230
三、 腐蚀性气流.....	231
四、 高压气流.....	231
五、 反应气流.....	232
六、 高温气流.....	232
七、 超细粉尘气流.....	233
八、 不稳定气流.....	233
§ 8-3 余热锅炉水循环 .....	234
一、 循环方式的比较.....	234
二、 自然循环设计特点.....	235
三、 强制循环设计特点.....	241
§ 8-4 余热锅炉传热计算 .....	246
一、 辐射冷却室传热计算.....	246
二、 对流受热面传热计算.....	248
三、 扩展表面对流受热面传热计算.....	252
四、 烟管传热强化.....	255
§ 8-5 烟气腐蚀及其防止 .....	257
一、 低温腐蚀.....	257
二、 高温腐蚀.....	260
§ 8-6 受热面积灰及其防止 .....	261
§ 8-7 对流受热面的磨损及其防止 .....	265
§ 8-8 余热锅炉某些特殊结构的考虑 .....	266
一、 急冷余热锅炉进口气体分配室.....	266
二、 管板结构.....	267
三、 管口热保护.....	269
第八章 参考文献.....	271
第九章 其它节能设备 .....	273

§ 9-1 换热器 .....	273
一、 气—气换热器.....	273
二、 气—液和液—液换热器.....	277
三、 换热器传热强化.....	279
§ 9-2 热管换热器 .....	282
一、 热管工作原理.....	282
二、 热管工作性能.....	284
三、 热管换热器.....	288
§ 9-3 热泵 .....	291
一、 热泵工作原理.....	291
二、 热泵应用.....	294
§ 9-4 蓄热器 .....	298
一、 蓄热器原理.....	298
二、 蓄热器应用效果.....	301
三、 蓄热器应用.....	302
第九章 参考文献.....	304
附录 .....	305
表 I 常用法定计量单位与工程 制单位的换算.....	305
表 II 部分常用材料的热物理性质.....	305
表 III 保温及耐火材料导热系数 与温度的关系.....	306
表 IV 气体的平均定压容积比热容.....	307
表 V 干空气的热物理性质.....	307
表 VI 平均成分烟气的热物理性质.....	307
表 VII 饱和水的热物理性质.....	308
表 VIII 干饱和水蒸汽的热物理性质.....	308



# 第一章 总 论

## §1-1 能源在国民经济中的重要性

**能源是指为人类生产与生活提供能量和动力的物质资源**，如煤炭、石油、天然气、植物燃料、水能、风能、太阳能、地热能、海洋能、潮汐能、原子能等，以及由这些天然资源加工而成的电能、蒸汽、焦炭、煤气、各种石油制品、沼气、酒精、氢气等，都叫做能源。人们可以按需要把它们转换成热能、机械能、电能、光能、声能、化学能等形式加以利用。社会经济的发展，人民生活水平的提高，都与能源消费的增长密切相关。由于能源生产和消费的不断增长，使社会生产力有了大幅度的提高，才使人类社会的面貌发生根本的变化。由人类社会的发展史可以充分地看到能源在国民经济中的重要地位。

早在远古时代，人类为了生存，摄取经过太阳光合作用由碳水化合物组成的各种食物，把太阳能转换为人类活动的机械能。人类学会使用火以后，开始自觉利用能源，用来取暖、煮饭、照明等等，估计当时每人一年的能源消耗量约为  $(5\sim 10)\times 10^4\text{kJ}$ ，主要的能源是薪柴燃料。后来人类开始使用畜力、水力和风力的能源，大大推动了社会的发展。一直到公元前，人类平均的年耗能量可能达到  $150\times 10^4\text{kJ}$ 。在18世纪以前，人类主要依靠自身的体力及一部分畜力和有限的自然资源，如薪柴、水力、风力等，因此社会生产力极低，发展速度缓慢，人民生活十分简陋。到了18世纪，人们发现了煤炭能源，1785年瓦特发明了蒸汽机，从此人类开始掌握了能源相互转换的方法，引起了产业革命，大大提高了劳动生产率。这是能源发展史上的第一次重大突破，促进了社会生产力的迅猛发展，人民生活有了很大的提高。随着产业革命的蓬勃发展，到19世纪中叶，人们又钻探出了新的能源——石油，利用液体燃料又发明了内燃机，进一步促进了水、陆交通运输的发展。1881年爱迪生建立了世界上第一个发电站，用四台184kW的燃煤锅炉供应蒸汽，驱动六台蒸汽机带动发电机发电。电的发明和利用使能源发展又一次取得重大突破，使人类社会生产和生活进入了电气化的新时代。由于电能具有使用方便、容易转换为它种能量、输送迅速、便于集中和分散使用等一系列优点，引起了生产工艺机械化、自动化的重大变革，为社会大生产和最新技术发展开创了广阔的前景。同时电气化进一步提高了人们的物质文化生活水平。由能源发展的过程可见，能源发展的每一次重大突破，都伴随着生产技术的重大变革，并引起社会生产方式的变化，使国民经济加速发展。

随着各种机器的大量应用，煤炭、石油、电力获得了广泛的利用，使世界能源消耗量迅猛增加，几乎按指数曲线上升，如图1-1所示。近几十年来，每年的能耗增长率为5%，即10年多增长一倍。1984年世界能源的年耗量已达到163亿t标准煤，约  $84\times 10^{12}\text{kW}\cdot\text{h}$ ；按人平均的能耗量为2.3t标准煤，即  $18.7\times 10^8\text{kW}\cdot\text{h}$ ，或  $67.3\times 10^6\text{kJ}$ 。预计到2000年，世界能源消费将再增加一倍，达到200亿t标准煤。目前世界能源的构成以石油、煤炭、天然气为主，例如1983年世界能源的构成如表1-1所示。由于能源消费激增，造成能源供应紧张，为

了保证国民生产的持续发展，世界各国都在寻找各种办法，以便更加有效地开发和利用能源，因此能源问题已经成为一个世界性的突出问题。

由以上可以看出，能源是推动社会生产发展的巨大动力，只有能源发展了，整个国民经济才能得到发展，四个现代化才能实现。世界各国经济、技术发展的事实表明，经济和技术越发展，机械化、电气化、自动化水平越高，劳动生产率越高，产品就越多，国民生产总值就越大，其能源消耗量也就越大。能源消耗与国民生产总值之间有着非常密切的关系。在正常情况下，能源消费量的增长速度和国民生产总值的发展速度之间成正比关系。表 1-2 为主要工业国家 1950~1975 年间能源、电力和国民生产总值年增长率的数椐。

由表可见，日本的能源消费量增长最快，平均每年为 8.8%，它的国民生产总值增长也最快，平均每年为 8.7%；英国的能源消费量增长最慢，平均每年为 1.2%，它的国民生产总值增长也最慢，平均每年只有 2.6%。对同一个国家来说，不同时期也是如此。日本在 60 年代能源消费量增长速度最快，平均每年为 12.2%，国民生产总值的增长速度也最快，平均每年为 10.8%；70 年代由于能源危机，能源消费增长减慢，平均每年 3%，国民生产总值的增长速度也最慢，平均每年只有 5.4%。因此，不论哪个国家，若要加快国民经济的发展，就必须保证能源消费量有相应的增长速度。相反，如果能源供应不足，则会直接影响国民经济的发展，甚至造成巨大的损失。例如从 70 年代开始，资本主义世界发生了石油危机，主要工业国家国民生产总值的增长率普遍下降，在 1975 年，美国由于能源短缺 1.16 亿 t 标准煤，使国民生产总值减少了 930 亿美元；日本由于能源短缺 0.6 亿 t 标准煤，国民生产总值减少了 485 亿美元。其它工业国家也相类似。据分析估算，由于能源不足引起的国民经济损失大约为能源本身价值的 20~60 倍。

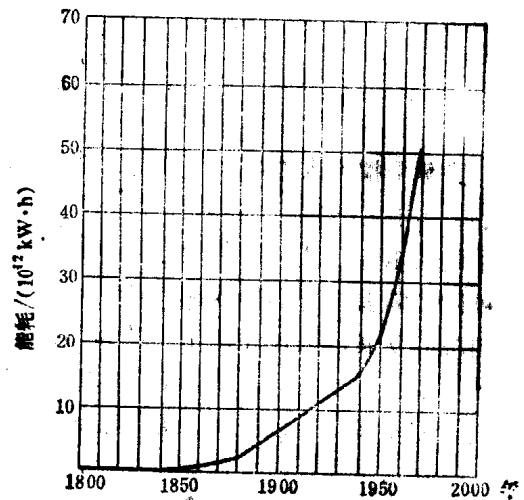


图 1-1 世界能耗的增长

表 1-1 1983 年世界能源构成情况

能源种类	石油	煤炭	天然气	水力	核能
构成百分率×100	41.2	29.9	19.2	6.5	3.2

表 1-2 1950~1975 年主要工业国家能源、电力和国民生产总值的年平均增长率

国别	能源消费年平均增长率×100	电能消耗年平均增长率×100	国民生产总值年平均增长率×100
日本	8.8	10.1	8.7
苏联	6.5	10.1	8.3
联邦德国	4.0	8.0	5.4
法国	3.9	7.0	4.8
美国	2.9	6.8	3.3
英国	1.2	6.5	2.6

世界不同国家在发展国民生产方面存在很大的差距，其重要原因之一就是在能源消费水平上的差别。部分工业发达国家1975年能源消费和国民生产总值如表1-3所示。美国人均能耗达到11 t 标准煤，为世界平均能耗2.3 t 标准煤的4.8倍；而发展中国家的人均能耗仅0.79 t 标准煤，可见差距之大，当然在国民生产总值上也要有很大的差距。由此可见，为了提高人均国民生产总值，提高国民经济发展速度，必须加强能源建设，提高人均能源消费水平。

表1-3 部分工业国家1975年能源消费与国民生产总值水平

国 别	国民生产总值 1亿美元	能源消费量 1亿 t 标准煤	人均产值 /(美元·人 <sup>-1</sup> )	人均能耗/ (t 标准煤·人 <sup>-1</sup> )	人均电耗 (kW·h·人 <sup>-1</sup> )
美国	15057	23.50	7051	11.0	9370
日本	4906	4.02	4397	3.6	4265
联邦德国	4247	3.30	7098	5.5	5044
法国	3357	2.09	6359	4.0	3381
英国	2295	2.95	4101	5.3	4864

由以上所述可知，能源是创造国民生产总值的重要物质基础，在国民经济中占有十分重要的地位。因此，在我国实现四个现代化的进程中，能源工业必将得到蓬勃的发展。

## §1-2 能源分类和利用

地球上的能源按其来源大体上可分为三大类：

第一类是来自地球以外的天体的能量，其中最主要的是太阳辐射能。目前人类所需能量的绝大部分，都直接或间接来源于太阳能。地球上的煤炭、石油、天然气等矿物燃料是由古代动植物沉积在地下经过漫长的地质年代形成的，而其能量来源于太阳辐射能通过光化作用等过程而形成。至于水能、风能、海洋能等也都来源于太阳辐射能。另外，生物质能是植物通过光化作用由太阳辐射能转化而来。从数量上看，太阳能是非常巨大的能量。据估计，地球表面一年从太阳获得的总能量可达  $6 \times 10^{17} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，现在全世界一年消耗的能量仅及其万分之一。但是由于太阳能比较分散，能量密度不大，因此尚难加以利用，目前主要是利用太阳能直接转换成热能，用于采暖和空调、干燥、蒸馏、制取淡水及生产热水等方面。

第二类是地球本身蕴藏的能量，主要有原子核能和地热能。原子核能是原子核发生反应而释放出来的能量。原子核反应有裂变反应和聚变反应两种。1kg 铀-235 裂变时放出的能量为  $8.32 \times 10^{10} \text{ kJ}$ ，相当于2000 t 石油的能量；1kg 氘聚变时放出的能量为  $35 \times 10^{10} \text{ kJ}$ ，相当于8000 t 石油的能量。目前的核电站均是利用核裂变反应，已勘探到的铀、钍矿所具有的能量相当于煤炭储量的几十倍，正得到迅速的发展。核聚变尚在研究之中，如果核聚变能实现的话，则一桶水中含有的核聚变燃料就相当于300桶石油的能量，到那时将为人类提供无穷无尽的动力，从而可在根本上解决能源问题。

地球本身是一个大热库，从地面向下，随着深度增加，温度也不断增高。地热能的理论储量很大，仅在10km以内的地壳表层中所拥有的能量就相当于煤炭总储量的2000倍。地热是一种廉价的能源，可用于取暖、供热和发电。但是，由于地热是低品位能源，因此开发数量不大，在能源消费中不会占多大的比重。

第三类是由于地球和其它天体相互作用而产生的能量，如潮汐能，人们也正在试用。

人们通常把自然界自然存在的、没有经过加工或转换的能源称为一次能源,或天然能源,由一次能源经过加工或转换而得到的能源称为二次能源,或人工能源。一次能源还可以根据它们是否能够再生而分为再生能源与非再生能源两类。再生能源是指能重复产生的自然能源,它们是不会随着它本身的转化或人类的利用而日益减少的能源。水能、风能、太阳辐射能、海洋能、地热能、草木燃料等都是再生能源,它们可源源不断地从自然界中得到补充,是人类取之不尽、用之不竭的能源。非再生能源是指那些不能重复产生的自然能源,如煤炭、石油、天然气等矿物燃料及核燃料铀、钍等,它们是随着人类的利用而越来越少;总有一天会被人类用完。

从能源的性质来看,可以分为燃料能源和非燃料能源两类。属于燃料能源的有矿物燃料,如煤炭、石油、天然气等;生物燃料,如薪柴、沼气以及各种有机废物等;化工燃料,如丙烷、甲醇、酒精、苯胺等;及核燃料,如铀、钍等共四种。其中核燃料是利用其原子核能,其它燃料主要利用其化学能。非燃料能源有的利用机械能,如风能、水能、波浪能、潮汐能等;有的利用热能,如地热能、海洋温差、余热等;有的利用光能,如太阳能等。

按照能源本身的特征,还可以分为含能体能源和过程性能源两大类。各种矿物燃料、核燃料、地热、高位水库、氢能等都是含能体能源;风、流水、海流、潮汐、地震、以及我们广泛应用的电能等都是过程性能源。过程性能源无法直接大量储存,如需加以储存,一般需先把它们转换成含能体能源。例如,为了储存流水的动能,就要修筑水坝,把流水的动能转换为高位水的势能;又如,为了储存电能,需采用蓄电池,将电能转变成化学能。

在各种能源中,目前正得到广泛应用的能源,如煤炭、石油、天然气、水力等,称为常规能源;新近才利用的能源或正在开发研究的能源,如核裂变、核聚变、太阳能、地热能、海洋能、风能等,称为新能源。所谓新能源,是相对于常规能源而言的。现在的常规能源在过去也曾是新能源,今天的新能源将来又要成为常规能源。例如核裂变,目前基本上已经成熟,在许多国家已经广泛使用,已成为常规能源。在常规能源中,目前也正在研究新的利用技术,如磁流体发电就是利用煤、石油、天然气作燃料,把气体加热成为高温等离子体,在通过强磁场时直接发电。磁流体-蒸汽动力联合循环电站的效率可达(50~60)%,而一般火电厂的效率为(30~40)%,因而可大幅度地提高能源的利用率。

人们还根据能源在使用中对环境污染的程度分成清洁能源和非清洁能源。把无污染或污染小的能源称为清洁能源,如太阳能、风能、水能、海洋能、氢能、气体燃料等;污染大的能源称为非清洁能源,如煤炭、石油等。由于能源利用中对环境的污染十分严重,因此人们对发展清洁能源及降低非清洁能源对环境的污染十分重视。

综上所述,能源的种类繁多,形式多样,现将能源的分类归纳如表1-4和表1-5所示。

表1-4 根据能源来源的分类

类 别	再 生 能 源	非 再 生 能 源
第一类能源 (来自地球以外)	风能、水流、波浪、海流、 海洋热能、太阳能、植物燃料	煤、石油、天然气、油页岩
第二类能源 (来自地球内部)	地下热水、地热蒸汽、 地震能、火山能、热岩层	核燃料——铀、钍、氘等
第三类能源 (来自地球和其它天体的作用)	潮汐能	

表1-5 能源分类表

类别		一次能源	二次能源
常规能源	燃料能源	煤、石油、天然气、油页岩、植物燃料	煤气、焦炭、汽油、煤油、柴油、重油、液化石油气、丙烷、甲醇、酒精、苯胺
	非燃料能源	水能	电能、蒸汽、热水、余热
新能源	燃料能源	核燃料—铀、钍、钚等	沼气、氢能
	非燃料能源	太阳能、风能、地热能、潮汐能、海洋热能、波浪能、海流	

各种能源的转换和利用的情况如图1-2所示。上面一排表示各种能源。煤、石油、天然气、有机物及由有机物产生的沼气、由太阳能和核能从水中制取的氢等，除一部分（虚线表示）作为原料使用外，绝大部分都在各种炉子和工业热装置中通过燃烧转化为热能。核能则通过反应堆转化为热能。此外还可从地热、太阳能直接得到热能。水力可以通过水轮机、风力可以通过风车直接转变成机械能。使用光电池或燃料电池，可以直接从太阳能或燃料得到电能。但由于经济上的考虑，实际上目前的电能几乎都是通过发电机由机械能转化来的。电能可以方便地通过电动机或电炉等再转化为机械能或热能，而且输送方便，因此是使用比较方便的能源形式。实际上，人们使用得最多的三种能量形式——热能、机械能、电能，都是可以通过一定的设备如热机等相互转化的。目前绝大多数能源都是首先经过热的形式，或者直接使用，或者通过热机转化为机械能或电能再使用。

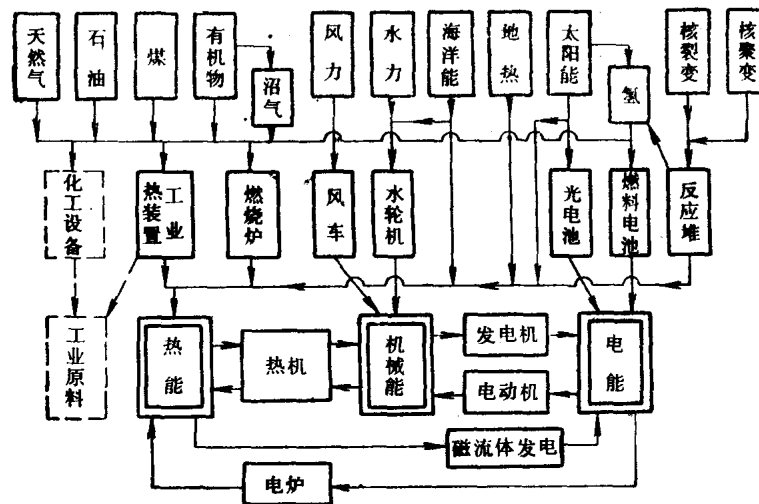


图1-2 各种能源的转换和利用情况

人类是随着生产和科学技术的发展，逐步地扩大能源利用范围的。在历史发展过程中，人类首先使用火来供应所需要的能量，后来又增加了风力、水力等自然动力作为能源。煤、石油、天然气的应用虽然很早，但长期主要用于提供热能和照明，直到18世纪，蒸汽机发明后，人们才开始把蕴藏在煤中的能量转变为动力（机械能）使用。近代，电能得到了广泛的应用，本世纪40年代以来，人们又开始利用原子核能。可以说，每一次能源利用范围的扩大，都伴随着生产技术的重大变革，甚至引起整个社会生产方式的革命。在能源利用史上，火的

使用、蒸汽机的发明、电能和原子核能的应用对社会生产力的发展起了非常重大的推动作用，因而可以说是能源利用史上四次重大的突破。

能源的种类很多，各有优缺点，从目前的技术水平来看，评价能源品质的技术指标主要有下列几个方面：

1. 能流密度。也就是在一定空间或面积内，从某种能源实际所能得到的能量或功率。显然，如果能流密度很小，就很难作为主要能源。按照目前的科技水平，太阳能和风能的能流密度很小，大约为 $100\text{W}/\text{m}^2$ 左右；核能的能流密度则很大；现用的各种常规能源的能流密度也比较大。

2. 开发费用和价格。太阳能、风力等不花任何成本就能得到；各种矿物燃料与核燃料，从勘测、开采，到加工、运输等都需要人力和物力的投资，而且有的工序对劳动者还有一定的危险性和损害人体健康。可是如果考虑到设备的价格，依据目前的技术水平估计，太阳能、风力、海洋能等发电设备的单价为每千瓦几千元到上万元，初投资太大；而天然气和石油的燃烧装置价格只有前者的几十分之一，初投资便宜；燃煤和水力设备的单价为每千瓦几百元到一千元左右，也比太阳能、风力等便宜得多。

3. 存储可能性与供能连续性。即不需用时可以存储起来，需用时能立即供应能量。在这方面，太阳能、风力等目前尚难做到，而矿石燃料与核燃料则比较容易实现。

4. 运输费用与损耗。太阳能、风力、地热等均是难以运输的，而石油与天然气则很容易从产地输送到用户。运煤稍为困难一些。水力发电站如果远离用户，则远距离输送按目前的技术水平，损失也不小，而且投资也比较大。

5. 对环境的污染。污染的主要来源是耗能设备的排放物等，随着耗能量增加，产生污染的程度越来越严重。原子能的可能危险性大家都很重视，应用时定会注意采取各种安全措施，但对烧煤的污染危害性目前还重视不够。水力的开发对生态平衡、土地盐碱化、灌溉与航运等的影响应加以注意。太阳能、风能等则基本上是无污染的能源。

6. 储藏量。这是必要条件。我国煤炭、水力资源丰富，其它常规能源与新能源资源也不少，有些正在勘探中，前景很好。与储量有关的评价还应考虑其再生可能性及地理分布情况。太阳能、水力、风力、地热、有机物等是可再生资源，矿物燃料与核燃料则不能再生。能源的地理分布对它的使用很有关系。例如我国煤炭资源偏于西北，水力资源偏于西南，都对它的使用有影响。

7. 能源品位。能够直接变成机械能和电能的能源，如水力，其品位要比须先经过热这个环节的能源，如矿物燃料，高一些。在热机循环中，热源温度越高，冷源温度越低，则循环热效率就越高，即热量可以转化为机械功的部分越大。我们对能够得到较高热源温度的能源称为高品位能源，否则是低品位能源。在使用时应安排好不同品位能源的合理应用，使其用得其所。

## §1-3 能源资源与消费

### 一、世界能源概况

世界能源需要量随着经济发展、工业现代化、人口增长及人民生活水平的提高而显著增加。自1950年以来世界能源消耗及能源消费构成的情况如表1-6所示。

表1-6 世界能源消耗及其构成

年 份	能源总耗 量/亿 t 标准煤	能源消费百分率×100			
		煤炭	石油	天然气	水力和原子能
1950	26.64	59.3	29.8	9.3	1.6
1960	40.19	51.0	32.2	4.7	2.1
1970	65.12	34.9	42.7	19.8	2.4
1979	87.06	31.4	44.1	21.2	3.3

由表可见,近30年中能源消耗的增长速度很快,1979年的能源消耗量为1950年的3.27倍,差不多15年左右增长一倍。在能源构成中,主要是石油、煤炭和天然气。在50年代,煤炭是主要能源,自60年代起石油、天然气的消费量急剧增加。但自70年代发生石油危机以来,石油增长速度减慢。由于煤炭储量丰富,在今后,煤炭仍将作为主要能源。此外,随着原子能技术的进展,原子能的利用将以更快的速度增长。

石油是目前消费最多的能源,可是世界石油的储量有限。到1983年底世界探明的石油可采储量为920亿 t,目前的年消费量大约为30亿 t,因此即使今后保持这样的消费量水平,也只能维持30年左右。

天然气是清洁能源,在近几十年中发展很快。1983年世界天然气的产量达 $1.55 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,为1950年的8.1倍、1960年的3.4倍、1970年的1.55倍。可是,天然气的储量也不充足,到1983年底,世界天然气的探明储量为 $90 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,可使用50年左右。

在矿物燃料中,煤炭是储量最丰富的能源。估计世界煤炭资源的可采储量约6800亿 t 标准煤,1983年世界原煤产量约40亿 t,而煤炭的总资源估计在 $10^5$ 亿 t 以上,因此煤炭储量还可以开采200年以上。根据矿物燃料的资源,今后应对煤炭给予更多的注意,在能源结构中,从油转向煤的趋势将更加迅速。

世界水力资源的容量估计有22亿kW,已运转的容量为3.72亿kW,占总容量的16.9%。由于水力资源在能源构成中的比例较小,因此其地位相对较小。

原子能是近年来发展迅速的新能源。当前核电站已经达到技术上成熟、经济上有竞争能力、工业上可以大规模推广的阶段。目前比较成熟的有三种堆型:轻水堆、天然铀石墨气冷堆和天然铀重水堆,今后的发展趋势是轻水堆、天然铀重水堆和快中子增殖堆。到1985年底为止,全世界已有反应堆374座,发电容量2.48亿kW,发电量占世界总发电量的15%。在欧美,原子能发电的比例已达25%,法国已达65%,日本达到26%。预计到1990年原子能反应堆将达到537座,容量达到4.2亿kW。目前已探明的天然铀储量至少有460万 t,其能量相当于 $4 \times 10^4$ 亿吨优质煤。因此,在未来能源结构中,原子能的比例将逐年增加,预计到本世纪末,原子能在一次能源消费中的比例将增加到8%左右,到2020年将增加到12%。

其它新能源,如太阳能、地热能、海洋能,理论上的储量均很大而且又是再生能源,目前已受到重视,正加以开发利用。例如,目前已采用平板型集热器或抛物面型反射聚光器使太阳光聚集,用来直接加热某种物体,利用其热能,取得了很好的效果,可广泛应用于建筑物的采暖和空调、干燥、蒸馏、造冰、制取淡水等,也可用来产生动力和用于发电。目前正在研究利用太阳能电池直接进行光—电转换,将太阳辐射能直接转换成电能,已在卫星空间技术上应用。此外,人们还在设想建立大功率空间太阳能电站,在卫星上将太阳能通过光电

池转变成电能,用微波发生器将电能转变成微波,然后以集束形式把微波发射到地面接收站,再将微波转变成电能。这样,由许多卫星组成的卫星站网将为人提供充足的电力。地热也已在有地热资源的地区加以开发利用,除用于供热外,目前已建成地热电站143座,总装机容量达900万kW,主要是在近十多年的时间内建立的。其它如海洋能、风能等也开始得到开发利用。这些新能源虽然资源丰富,但是由于其能流密度太小,开发费用和设备价格昂贵,估计在一定时间内在能源结构中还不会有重要影响。

在二次能源中,电能是最重要的能源。由于电力具有便于转换、输送和控制,并且清洁等优点,扩大电力的使用已成为各国经济和工业发展的重要特点。1950年世界电力的总装机容量为1.35亿kW,到1982年增加到21.6亿kW,增长了15倍,平均年增长率为9.06%。1950年时世界总发电量为9500亿kW·h,1982年增加到84400亿kW·h,增长了7.9倍,平均年增长率为7.04%。可见电力消费的增长速度超前于国民经济的增长。发电能源消费在能源总消费中的比重,是衡量一个国家电气化程度的重要标志,表1-7列出部分国家的情况及到本世纪末的预测值,可见各国对发展电力十分重视。据统计,加速电气化可节约总能耗,例如发电能耗占30%左右的工业发达国家,其每一美元产值的能源消费水平为0.5~1kg标准煤,而发电能耗占17.5%左右的发展中国家,每一美元产值的能耗为2kg标准煤左右。因此,发展电力是节约能源的重要途径。此外,发展电力还能节约劳动力、改善劳动和生活条件,并能减少环境污染,受到普遍的欢迎。因而电力工业还将得到迅速的发展。

表1-7 发电能耗占总能耗的百分率×100

国 家	全世界	美 国	苏 联	日 本	联邦德国
1975	24.6	28.9		28.3	29
1980		32.2	33.3	32.3	31.6
1982		34	34.2	32.6	33.4
2000	44.3	50		45	45

由上述资料可以看出,当前世界能源仍以油、气、煤三大矿物燃料为主。由于石油、天然气的发热量高,使用方便,从60年代以来得到迅速发展,目前在能源结构中仍居领先地位。但是,由于油、气资源有限,而煤炭资源丰富,因而加快对煤炭利用的研究,逐步增加煤炭在能源构成中的比重,并发展煤炭气化和液化技术,以局部代替油、气的使用,在今后一段时间内将有十分重要的意义。在新能源方面,无疑,原子能发电将得到迅速发展,其在能源构成中的比重将逐年增加。可是,由于天然铀的储量也有限,并且存在着放射性污染的危险,人们普遍有恐惧心理,阻碍着原子能的发展。其它新能源在近期内还不会起重要作用。因此能源问题在当今世界上还是一个突出问题,受到人们的普遍关注。

能源消费中按部门的构成情况如表1-8所示。

表1-8 按部门划分的能源消费比率×100

部 门	美 国 (1980年)	日 本 (1980年)	英 国 (1980年)	法 国 (1978年)
工业	39.7	58.5	34.1	44.5
民用和商业	35.9	21.5	41.0	36.3
运输	24.4	22.0	24.9	19.2
合 计	100	100	100	100



## 二、我国能源概况

我国能源资源比较丰富，尤以煤炭和水力资源更为丰富。我国煤炭探明储量有7000多亿t，居世界第三位，山西省的煤炭储量2000多亿t，内蒙约1900亿t，陕北有1000亿t。煤炭可采储量估计有1700亿t。水力资源的理论蕴藏量有6.8亿kW，居世界首位，其中可开发利用的为3.8亿kW，年发电量可达1.9万亿kW·h，相当于7亿t标准煤。其中以西南地区为最多，约占71%，云南、四川和西藏的水力资源均超过1亿kW。其次是中南和西北地区，分别占全国的14%和10%左右。石油和天然气的储量也较丰富，目前估计石油的储量约70亿t，可采储量约27亿t。天然气可采储量估计8700亿m<sup>3</sup>。我国1983年共生产原煤7.15亿t，石油1.06亿t，天然气119亿m<sup>3</sup>，水力发电850亿kW·h，总能源生产量折标准煤7.13亿t。1983年能源总消费量6.56亿吨标准煤，能源消费的构成如表1-9所示。

表1-9 我国一次能源消费的构成

年 份	能源总耗 量/亿t标准煤	能源消费百分率×100			
		煤炭	石油	天然气	水力
1980	6.03	71.81	21.05	3.14	4.0
1983	6.56	73.71	18.56	2.47	5.26

建国以来，我国能源工业有了迅速的发展。表1-10列出了我国能源生产发展的概况。由表可见，1983年与1949年相比，能源产量增长了30倍。预计到1990年时，原煤产量将达10亿t，石油产量达到1.6亿t，到本世纪末，能源总产量达到12亿t标准煤。近几年中，我国能源生产持续稳定增产，1984年一次能源产量增长7.4%，1985年增长7.8%，一次能源总产量达到8.25亿t，煤炭产量8.3亿t，居世界第二位。由上述可见，我国能源是以煤炭为主，其在一次能源中的比重在70%以上。其次为石油，特别自70年代以来，随着大庆、胜利等几个大油田的投产，石油产量逐步上升，目前能稳定在1亿t的水平。水力资源正在逐步开发，比重也在上升。天然气的产量相对较小，特别是与国外油气比例相比，我国天然气的产量应该进一步增加。原子能还处于开始起步的阶段，到下一世纪才会有较快的发展。

表1-10 我国能源生产发展概况

年 份	煤炭/亿t	石油/亿t	天然气/亿m <sup>3</sup>	水力/亿kW·h	总计/ 亿t标准煤
1949	0.32	0.001	0.07	7	0.23
1952	0.66	0.004	0.08	13	0.48
1957	1.31	0.015	0.7	48	0.99
1965	2.32	0.11	11	104	1.87
1970	3.54	0.31	29	205	3.10
1975	4.82	0.77	88	476	4.86
1980	6.07	1.06	139	567	6.27
1983	7.15	1.06	119	850	7.13

我国电力工业也取得了迅速的发展，装机容量已由1949年的185万kW增加到1985年的850万kW，其中火力发电容量占70%，水力发电容量占30%，增长了45倍。发电量由1949年的43亿kW·h增加到1985年的4073亿kW·h，其中火力发电占78%，水电发电占22%，增长了94倍。发电能耗占一次能源总耗量的21%。正如前面所述，由于电力工业对国民经济的