

实用 余热回收和 利用技术

〔中国〕刘纪福

白荣春 编著

〔日本〕山本格

机械工业出版社

7401
L 67

372651

实用余热回收和利用技术

〔中国〕 刘纪福
白荣春 编著
〔日本〕 山本格



机械工业出版社

(京) 新登字054号

2011/63

本书系统地介绍了中国和日本两国的工业余热回收和利用技术,内容丰富,实用性强。书中阐述了余热回收利用的基本问题,介绍了余热回收用的热交换器、余热锅炉以及余热的动力转换技术、吸收式制冷机和热泵,并对中、日两国在钢铁、化工、水泥、造纸、食品工业以及工业炉窑、废弃物的焚烧等领域中已开发并实施的余热回收和利用技术作了扼要介绍,列举了大量有代表性的应用实例。书中还介绍了在余热回收和利用工程中具有重要地位的保温和保温工程、传热技术、腐蚀、积灰及其对策、控制技术 etc。

本书可供从事能源与节能工作的工程技术人员、管理人员使用,也可作为大专院校、中等专业学校有关专业师生的教学参考书。

实用余热回收和利用技术



责任编辑:王琳 责任校对:孙志筠
封面设计:邵景云 版式设计:王颖
责任印制:李子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国铁道出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $17^{1/4}$ · 字数 381 千字
1993年12月北京第1版·1993年12月北京第1次印刷
印数 0 001—1 700 · 定价:19.50 元

ISBN 7-111-03830-4/TK·145

前 言

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础，能源利用程度是反映人类进步的一个重要标志。同时，以矿石原料为主的能源消费及其废弃物的排放又对人类的生存环境造成极大的影响。因此，合理利用能源、保护人类生存环境已成为全世界关注的重大问题。

中国和日本在能源问题上有着不同的特点：中国的能源资源比较丰富，能源结构以煤为主，能源利用率较低，对环境污染较严重；日本的能源资源比较贫乏，能源结构以进口石油、天然气为主，能源利用率高，对环境污染较少。但是，中、日两国根据各自的国情和能源利用技术状况都长期开展了以提高能源利用率为中心的节能工作。工业余热的回收和利用是提高能源利用率和保护环境的重要措施，对加速国民经济发展具有重要意义。因此，在中、日两国的节能工作中，工业余热的回收和利用受到极大的关注，两国开发了多种多样受到工业界好评的实用余热回收和利用技术，取得了显著的经济效益。中、日两国成功的实践表明，作为节能重要措施的工业余热的回收利用，将提高到二次能源开发利用的战略高度，受到更为广泛的关注。

日本在各工业部门已开发并实施了先进的余热回收和利用技术，每年都有一批优秀的节能成果受到奖励。中国在余热回收和利用方面也已取得可观的成果，但在节能技术的深度和广度上与日本相比还有较大的差距，编写本书的目的在于介绍中、日两国，特别是日本工业余热回收和利用的经验，以期对中国工业余热回收和利用的发展作些微薄的贡

献。

本书编著者山本格先生是日本通产省工业技术院环境资源研究所的研究人员、日本热管协会副会长、日本全国优秀节能成果的评审委员，长期从事节能技术的开发和研究工作；刘纪福是哈尔滨工业大学热工教研室教授，长期从事工业余热回收和利用的研究和推广工作；白荣春处长在国务院经济贸易办公室工作，曾长期从事节能技术和能源合理利用的管理工作。本书的编著者在长期的学术交往中，深感有必要就中、日两国的余热回收和利用技术进行总结和交流，因而决定合编本书。对此，中国机械工业出版社给予了大力支持。

本书编写的宗旨，一是突出实用性。书中大量介绍了有代表性的应用实例，并采用方案图、系统图和结构图表加以说明，以便为其推广提供实用的参考和借鉴；二是兼顾目前和未来发展。书中既着重介绍了现有条件下的实用技术，又介绍了今后将推广应用的先进技术，以期开阅读者的眼界，推进余热回收和利用技术的发展；三是尽可能涉及较多的行业、工业部门以及较广的技术领域，因为余热回收和利用本身是跨行业、跨部门的，且需要借助于众多科学分枝的成果。

对我们三位编著者来说，这是一项十分困难的任务，虽已尽力，但由于水平和实践经验所限，错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

谨向提供宝贵资料的单位和有关书刊的作者致谢，对中国机械工业出版社的大力支持致谢。

编著者

1992年11月

目 录

前言

第一章	能源现状与余热利用	1
第一节	中国的能源资源及其利用概况	1
第二节	能源形势与节能工作进展	5
第三节	余热资源及其分类	12
第四节	中国余热资源的回收利用概况	16
第二章	余热回收利用的基本问题	23
第一节	余热的数量评价	23
第二节	余热的质量评价	32
第三节	余热利用的三种基本形态	40
第三章	余热回收用热交换器	47
第一节	概述	47
第二节	回收高温余热的热交换器	52
第三节	具有高效传热表面的热交换器	58
第四节	热管换热器	72
第四章	余热锅炉	107
第一节	余热锅炉的形式及其特点	107
第二节	余热锅炉设计参数的选择	109
第三节	回收气体显热的余热锅炉	113
第四节	回收固体余热的余热锅炉	119
第五节	热管余热锅炉	122
第六节	余热锅炉及其附属设备的投资效果分析	128
第五章	余热的动力转换技术	132
第一节	动力转换热源及工质选择	132

第二节	蒸汽动力转换的循环及设备	139
第三节	余热蒸汽动力发电的实例	146
第四节	通过热电联产提高热能利用率	151
第五节	氟里昂动力转换的循环及设备	164
第六节	氟里昂发电系统的应用实例	176
第七节	利用有机流体的中、低温余热发电系统	176
第六章	吸收式制冷机和热泵	182
第一节	吸收式制冷机的工作原理	182
第二节	利用废汽和废水的吸收式制冷机	189
第三节	利用废排气的吸收式制冷机	193
第四节	热泵及其应用	197
第七章	钢铁工业的余热回收	207
第一节	概述	207
第二节	高炉炉顶压发电系统	211
第三节	赤热焦炭干式灭火系统	214
第四节	烧结矿石的显热回收	218
第五节	高炉和转炉炉渣的显热回收	228
第六节	钢铁工业中高温烟气余热的回收和利用	231
第七节	高炉热风炉排烟的余热回收	243
第八节	钢铁厂余热回收和利用的一体化方案	251
第八章	化学工业的余热回收	256
第一节	概述	256
第二节	蒸馏塔系统的完善及凝结水的余热回收	259
第三节	乙烯工厂的余热回收	263
第四节	石油化工厂中的动力回收系统	269
第五节	制碱工业的余热回收	273
第六节	硫酸厂的余热回收	280
第七节	化肥生产的余热回收	287
第八节	其他化工厂的余热利用实例	293

第九章	工业炉窑的余热回收	297
第一节	概述	297
第二节	工业炉常用的余热回收装置	302
第三节	钢板(坯)加热炉的余热回收	312
第四节	热处理炉的余热回收	318
第五节	锻造加热炉的余热回收	325
第六节	化铁炉和化铜炉的余热回收	328
第七节	玻璃窑炉的余热回收	341
第八节	工业炉余热用于空调和采暖	343
第十章	水泥工业的余热回收	348
第一节	概述	348
第二节	利用预热器排气的发电系统	350
第三节	熔渣冷却装置的余热利用	355
第四节	水泥厂余热回收的新技术	360
第十一章	造纸工业的余热回收	365
第一节	概述	365
第二节	机械制浆工程的余热回收	369
第三节	化学制浆工程的余热回收	371
第四节	抄纸机烘干设备的余热回收	376
第十二章	食品工业的余热回收	380
第一节	食品工业的用能特征	380
第二节	凝结水的余热回收	384
第三节	干燥装置的排热回收	386
第四节	多效蒸发浓缩系统的应用	396
第十三章	废弃物的焚烧及能量利用	399
第一节	概述	399
第二节	产业废弃物的焚烧和热能利用	403
第三节	都市垃圾的焚烧和热能利用	416
第十四章	保温和保温工程	422

第一节	保温的传热计算	422
第二节	保温材料的选用	432
第三节	保温工程	437
第四节	自由液面的保温——浮球毯的应用	445
第十五章	蓄热技术及其应用	450
第一节	蓄热形式及其分类	450
第二节	蓄热材料及特性	456
第三节	蓄热技术的应用	470
第四节	蒸汽蓄热器	475
第十六章	余热回收中的腐蚀、积灰及其对策	486
第一节	低温腐蚀及其对策	486
第二节	高温腐蚀及其对策	493
第三节	换热器的积灰及其对策	503
第十七章	余热回收系统的控制技术	514
第一节	控制与节能概述	514
第二节	余热回收工程中的控制系统	
第三节	最新检测控制技术的发展动向	524
附录		532
附录A	日本热交换器用材一览表	532
附录B	气—气型热管换热器的估算表 (GG-I)	534
附录C	气—气型热管换热器的估算表 (GG-II)	535
附录D	气—气型热管换热器的估算表 (GG-III)	536
附录E	气—气型热管换热器的估算表 (GG-IV)	537
附录F	气—液型热管换热器的估算表 (GL-I)	538
附录G	气—液型热管换热器的估算表 (GL-II)	539
附录H	复利系数 (USPW) 表	540
参考文献		540

第一章 能源现状与余热利用

第一节 中国的能源资源及其利用概况

能源是发展国民经济的重要物质基础。能源利用程度是反映技术进步的重要标志。中国是能源生产和消费大国，能源的生产建设和消费将制约中国国民经济的发展速度。

从常规能源的总储量来看，中国无疑是世界上拥有丰富能源资源的国家，居世界第三位。1980年底，全国煤炭保有储量为6424亿t，其中已利用储量为997亿t；探明石油地质储量71.4亿t，其中可采储量23.8亿t；油系天然气探明储量2617亿m³；水力资源的蕴藏量居世界首位，达6.8亿kW，其中可能开发的水力资源为3.8亿kW，每年可发电量 1.9×10^4 亿kW·h，相当于火电厂每年消耗10亿t原煤或5亿t原油。

中国的常规能源资源虽然丰富，但人口众多，按人口计算的可采储量低于世界的平均水平。煤炭资源只及世界平均水平的88.4%，石油为6.6%，天然气为1.5%，水力资源为0.7%。按人口平均计算的可采能源资源占有量，只相当于世界平均数的1/2，美国的1/10，前苏联的1/7。从人均占有的能源资源看，我国的能源资源并不丰富。

另一方面，从中国的能源资源来看，还存在以下一些不利条件：1) 能源资源分布不均衡，而且远离消费中心，因而增加了运输量和能源建设投资；2) 从能源资源的构成上

看,质量较差,致使能源的开采、运输和利用存在较多困难;3)能源资源勘探程度不高,可供开发的后备精查储量不足。

建国40多年来,中国的能源工业得到了迅速发展,1991年全国能源生产总量为10.47亿t(标准煤),比1979年的6.45亿t(标准煤)增加了4.02亿t(标准煤),平均每年增长4.1%。1991年原煤产量为10.90亿t,比1979年的6.35亿t增加了4.55亿t,居世界第一位;原油产量由1979年的1.06亿t增加到1991年的1.40亿t,居世界第六位;1991年发电量达到675TW·h,比1979年的282TW·h增加了393TW·h,平均每年增长7.5%。中国的能源工业虽然发展很快,但能源供应仍不能适应经济发展和提高人民生活的需要,主要表现在:人均能源消费量仅相当于世界平均水平的40%左右;由于能源(特别是电力)供应不足,有相当一部分工业生产能力不能发挥;农村生活用燃料,有75%靠生物质能。

中国的能源开发和利用有以下几个特点:

(1)煤炭是中国的主要能源,在能源消费构成中占70%以上,虽然近年来石油、天然气、水电在能源消费构成中的比例有所增加,但在2000年以前,中国的能源消费构成中将始终以煤炭为主。与此相反,几个主要工业发达国家的石油和天然气在能源消费构成中的比例都在70%以上,日本接近80%。

煤炭的开采投资大、矿井建设周期长,与其他能源相比,它的发热值低、灰分大、利用效率低,直接燃烧煤炭会造成严重的环境污染。

(2)能源利用效率低、经济效益差是中国能源利用中存在的主要问题。这可以从下述两个方面中国与其他国家的

差距来说明：一是每 1 美元国民生产总值所消耗的能源，二是主要工业部门的能源利用情况。

根据世界资源研究所和国际环境和发展研究所联合发表的题为《世界资源：1988—1989》的报告列举的统计数字，除前苏联以外的 10 个经济大国，每生产 1 美元国民生产总值的耗能量如下：

法国	8719kJ	日本	9797kJ
意大利	10989kJ	联邦德国	11304kJ
巴西	11369kJ	英国	14591kJ
美国	20664kJ	加拿大	24454kJ
印度	26348kJ	中国	43394kJ

通过比较中国和日本的几个主要工业部门的能源利用情况，也可以看出中国在能源利用方面的差距。

钢铁工业：吨钢能耗是钢铁工业能源利用状况的重要标志。日本是世界上吨钢能耗最低的国家之一。1986 年日本的吨钢综合能耗为 0.683t(标准煤)/t，而中国重点钢铁企业吨钢综合能耗为 1.295t(标准煤)/t，比日本高出 89.6%。

电力工业：供电煤耗指标是衡量一个国家火力发电能源利用状况的一项综合性技术经济指标。在工业发达国家中，前苏联、日本、法国的供电煤耗较低。1983 年日本的供电煤耗为 335g(标准煤)/(kW·h)，中国为 434g(标准煤)/(kW·h)，比日本高出 29.6%。

化学工业：以合成氨工业为例，1985 年，中国合成氨吨氨能耗为 2.10t(标准煤)/t，其中大型氨厂的吨氨能耗为 1.38t(标准煤)/t，比国外 80 年代初的先进水平高出 15%~30%；中型氨厂的吨氨能耗为 2.23t(标准煤)/t，比国外先进水平高出 26%~56%；小型氨厂的吨氨能耗为 2.37t(标准煤)/t，

比国外先进水平高138%。

建材工业：以水泥工业为例，1985年中国每吨水泥熟料的能耗为200.3kg(标准煤)/t，比日本1980年每吨水泥熟料的能耗121.1kg(标准煤)/t高出65.4%。

机械工业：以铸铁、铸钢、锻造、热处理等四个耗能多的热加工工艺和设备为例，每吨合格铸件综合能耗，1985年中国为0.728t(标准煤)/t，日本为0.308t(标准煤)/t，中国比日本高出1.36倍；每吨铸钢件综合能耗，日本为0.7~0.8t(标准煤)/t，中国为0.9~1.5t(标准煤)/t，中国比日本高出60%；自由锻件综合能耗，每吨大型水压机锻件中国为1.25~3.17t(标准煤)/t，工业发达国家为0.75~0.85t(标准煤)/t，每吨中、小型水压机和锤锻件中国为0.43~1.78t(标准煤)/t，工业发达国家为0.30~0.45t(标准煤)/t。

中国的能源利用效率与工业发达国家有很大差距，如表1-1所示，日本的能源利用效率为57%，美国为51%，而中国仅30%。

表1-1 日本、美国、中国的能源利用效率(%)

项 目 国 别	发电	工业	交通	民生	总效率
日 本	30.0	76.0	22.4	75.4	57.0
美 国	30.6	75.1	25.1	75.1	51.0
中 国	23.9	35.0	15.2	25.5	30.0

应该强调指出的是，由于中国以煤为主要燃料，而且利用效率较低，不但造成了能源的巨大浪费，并给环境带来了严重的污染。就全国范围而言，如果每年烧煤6亿t，就有相当于4亿多吨煤炭的热能没有得到充分利用而排放，此

外,还要排出1亿多吨煤灰、渣,近2000万t粉尘以及1000多万t二氧化硫,平均在每平方公里上,每年要飘落2t粉尘,弥漫1t二氧化硫。这些污染物质严重影响着中国的城镇,几乎所有的大、中型城市的大气飘尘浓度都超过国家规定的标准,有的城市已出现酸雨。由此可见,在发展工业的同时,不断提高能源利用效率,尽量减少对环境的污染,已成为一项刻不容缓的任务。

第二节 能源形势与节能工作进展

一、中国的能源形势与节能工作

中国本世纪末的经济发展战略目标是:在提高质量、优化结构、增进效益的基础上使中国国民经济的整体素质和综合国力迈上一个新台阶。从中国经济发展和能源消费的历史看,按目前的能源利用水平,要达到上述目标,能源需求量将达24亿t(标准煤)以上。但是,从能源供应方面看,到2000年中国一次能源的生产量只能达到14亿t(标准煤),即使要实现这个目标,任务也是很艰巨的。因此,在今后相当长的一段时间内,中国的能源形势是严峻的,能源仍是制约社会经济发展的重要因素。正是根据能源的供需形势和利用现状,中国政府提出了“在加强能源开发的同时,大力降低能源消耗”的发展战略,和“开发和节约并重,在近期内要把节能放在优先地位”的能源方针。

预测表明,为满足2000年的能源需求,有一半要靠节能,节能任务相当艰巨。正因为如此,中国政府从行政、立法、技术、经济等方面,采取一系列措施,加强了节能工作,把节能工作逐步引向深入。从1981年起,把节能列入国家五年计划和年度计划,加强了对节能的计划指导;1986

年，国务院发布了《节约能源管理暂行条例》，从宏观上进一步加强了对企业和用能单位的控制；依靠技术进步，以缺能地区和主要耗能行业为重点，本着花钱少、见效快、效果大的原则，开展了节能技术改造；通过调整经济结构，改善产业结构、行业结构、企业结构、产品结构，在取得同样经济增长速度的情况下，消耗较少能源；通过部分调整和放开能源价格、制订节能奖励办法、资助节能项目等经济手段调动企业和个人节能的积极性。由于采取以上一系列节能措施，10年多来中国的节能工作取得了较大成绩，对促进国民经济发展起了重要作用，主要表现在：

(1) 单位国民生产总值能耗逐年下降。1980年万元国民生产总值所消耗的能源为 13.36 t (标准煤)，1990 年为 9.3t (标准煤)，下降了30%，年平均节能率为3.5%，按环比计算，10年累计节约和少用能源量为2.70亿t (标准煤)。

1980年到1990年，能源消费弹性系数为0.56，这说明国民经济增长中大体上有一半是靠节能实现的。中国“一五”到“五五”期间的能源消费弹性系数为1.8，相比之下，降低了2/3。

(2) 主要耗能产品单位能耗有所下降。1980年到1990年，国家重点考核的60多种工业产品，单耗下降的达2/3。如火电厂供电煤耗由1980年的 448g (标准煤)/(kW·h) 降到1990年的427g(标准煤)/(kW·h)；每吨钢综合能耗由 2.04t (标准煤) 降到1.625t (标准煤)；每吨电解铝耗电由 20342 kW·h降到16750kW·h；大型化肥厂每吨氨耗标准煤由 1.4t 下降到1.36t；每吨原油加工耗标准煤由129kg下降到105kg，使中国的能源利用水平有所提高。

(3) 节约比开发投资节省、见效快。1981~1987年建

成节约每吨标准煤能力所需的基建投资为 315 元，比能源开发和运输、用能设备的综合投资节省约 $1/3$ ，投资回收期一般为 2 ~ 3 年。

(4) 促进了技术进步，提高了生产力。1981 ~ 1990 年，节能基建和节能技改形成年节约能力 5000 万 t (标准煤)。同时，新增热电装机 6100 MW，发展集中供热面积 62 Mm^2 ，城市煤气日供应能力 15 Mm^3 ，民用型煤年生产能力 12 Mt，煤炭洗选年加工能力 45 Mt。对缓解能源供需矛盾，改善环境质量，减轻大气污染和提高人民生活水平起了重要作用。

从近年来整个工业的节能量的构成来看，通过调整产业结构、行业结构、产品结构节省的能源大约占 50%；通过加强能源管理，进行节能技术改造节约的能源约占 30%；由于进口高耗能产品（例如钢材）而相应少用能源，约占 20%。

二、日本的能源形势与节能工作

日本是一个工业发达、消费大量能源的国家，1989 年日本能源消费总量为 336 亿 kL 原油，其中产业部门消费 178 亿 kL，占 53%；民用消费 82 亿 kL，占 24%；运输部门消费 77 亿 kL，占 23%。图 1-1 所示是日本能源消费结构变化图。日本是能源世界第四大消费国，同时又是常规能源（煤炭、石油、天然气）十分贫乏的国家，目前约 82% 的能源依靠进口。石油占全国能源消费量的 57.8%，而其中 99.7% 系由国外购进。

1973 年暴发的能源危机（实质上是石油危机）促使能源供应基础脆弱的日本高度重视能源问题。考虑到日本的能源现状和前景，为了确保经济的稳定发展，日本政府在能源研究和发展方面，投入了大量的人力、物力和财力，制订了一

个又一个的能源计划。表 1-2 所示是日本政府 1979 年、1980 年对能源研究开发的预算。

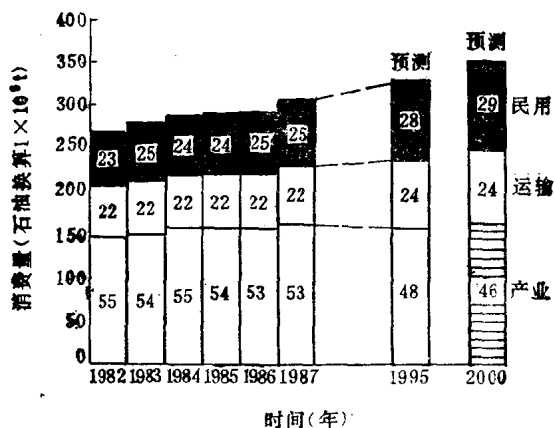


图 1-1 日本能源消费结构变化图

表 1-2 日本政府对能源研究开发的预算 (百万日元)

项 目	1979年	1980年	重点开发内容
原 子 能	173777	216105	新型核电站锅炉，核电站的安全
化石能源 (煤炭、石油、 天然气)	6486	28225	煤炭利用技术，重质油处理 技术
自然能源 (太阳能、地热、 风能、海洋能)	10307	30137	太阳能、地热、氢能（“阳 光”计划）
节 能	2976	8077	余热利用，高效透平，磁流 体力学（“月光”计划）
其 他	422	2051	与能源有关的基础研究
合 计	193968	248597	

注：本预算不包括对大学的投资。