

郭森魁 何屏 编著

余热利用

YU RE LI
YONG

云南科技出版社



YU RE LI KONG

ISBN 7-5416-1146-8



9 787541 611469 >

ISBN7-5416-1146-8/TB·22

定价: 20.00元

余 热 利 用

郭森魁 何 屏 编著

云南科技出版社

责任编辑:胡 平

封面设计:杨 峻

余 热 利 用

郭森魁 何 屏 编著

云南科技出版社出版发行(昆明市书林街100号)

昆明地质印刷所印装 新华书店经销

开本:787×1092 1/32 印张:9.75 字数:250千

1998年6月第1版 1998年6月第1次印刷

印数:1000

ISBN 7-5416-1146-8/TB·22 定价:20.00元

若发现印装错误请向承印厂联系

前 言

为提高企业能源利用率、节约能源,工业余热利用日益受到重视。本书是在近几年为热能工程专业本科生讲授余热利用课的基础上,结合笔者的科研工作,经整理编撰而成的。

本书主要内容为:我国能源和余热利用概况;余热利用回收装置、换热器和余热锅炉,包括间壁式换热器、热管换热器、冷却塔、各种余热锅炉和热泵等。讨论了它们的工作原理和热工计算,还简要介绍了它们在冶金和其它行业中的应用情况。本书内容涉及面广,适用性强,除作为热能工程及相关专业的教材外,也可供有关科技工作者参考。

全书共十一章,其中一章至四章和十章、十一章由郭森魁编写,五章至九章由何屏编写。

在本书编写和出版过程中,得到了昆明理工大学教务处、冶金系领导和同事们的关心和支持,在此深表谢意。

限于编著者水平,时间仓促,书中错漏在所难免,请读者指正。

郭森魁 何 屏

1998 年 5 月

目 录

1	能源现状与余热利用	(1)
1.1	我国的能源资源及其利用概况	(1)
1.2	余热和余热资源	(5)
1.3	余热利用总的原则和途径	(16)
2	间壁式换热器	(19)
2.1	换热器的分类及构造	(19)
2.2	间壁式换热器的传热计算	(24)
2.3	间壁式换热器的阻力计算	(50)
2.4	换热器计算实例	(52)
3	热管换热器	(59)
3.1	热管的基本结构和工作原理	(59)
3.2	热管换热器的结构和分类	(68)
3.3	热管换热器计算	(72)
3.4	热管换热器计算实例	(81)
4	冷却塔	(90)
4.1	概述	(90)
4.2	淋水、配水和通风系统	(93)
4.3	冷却塔的热力过程	(101)
4.4	冷却塔的通风阻力计算	(125)
5	余热锅炉概论	(129)
5.1	余热锅炉的发展简介	(129)
5.2	余热锅炉的特点及种类	(133)

5.3	余热锅炉的烟气特点	(140)
6	余热锅炉的积灰、腐蚀、磨损及其防止	(146)
6.1	积灰的机理、防止和清除	(146)
6.2	腐蚀及其防止	(152)
6.3	磨损及其防止	(165)
7	余热锅炉的热力计算	(168)
7.1	烟气的容积和焓	(168)
7.2	余热锅炉的热平衡	(170)
7.3	余热锅炉几何结构的初步确定	(175)
7.4	辐射冷却室传热计算	(179)
7.5	对流受热面的传热计算	(189)
8	余热锅炉的水循环	(199)
8.1	水循环基础	(200)
8.2	循环流动阻力计算	(207)
8.3	重位压差计算	(212)
8.4	水循环计算	(216)
9	几种行业余热锅炉概述	(224)
9.1	转炉炼钢余热锅炉	(224)
9.2	燃气——蒸汽联合循环和余热锅炉	(234)
9.3	干法熄焦余热锅炉	(245)
9.4	烟化炉余热锅炉	(247)
10	热泵	(250)
10.1	制冷机的工作原理	(250)
10.2	热泵的工作原理	(259)
11	冶金工业的余热利用	(269)
11.1	钢铁冶金中的余热回收	(269)
11.2	有色冶金中的余热回收	(287)

附录	(298)
表 1 部分均质物的贬值焓和标准比焓	(298)
参考文献	(302)

1 能源现状与余热利用

1.1 我国的能源资源及其利用概况

获得提供热、光和动力能量的源泉称为能源。能源就是能产生能量或可以作功的物质资源。能源是人类生存不可缺少的物质基础,也是发展国民经济的重要物质基础。能源的利用程度是反映技术进步的一个重要标志。

能源分类有多种方法。如可分为一次能源和二次能源;再生能源和非再生能源;燃料能源和非燃料能源;常规能源和新能源;载体能源和过程能源;清洁能源和非清洁能源;商品能源和非商品能源等。

我国是世界上拥有丰富能源资源的国家。以常规能源的总储量计,居世界第三位。1980 年底,全国煤炭保有储量为 6424 亿吨,仅次于美国和前苏联,石油可采储量 23.8 亿吨,居世界第八位;油系天然气探明储量 2617 亿 m^3 ,列第十六位;水力资源的蕴藏量居世界首位,达 6.8 亿 kW。

1949 年,全国能源产量为 2400 万 tce,到 1994 年能源产量为 11.2tce,建国以来能源生产发展很快,已增长了 46 倍,但供应仍十分紧张。主要表现在一是由于能源分布不均衡,而且远离消费中心,因此一次能源运输紧张;二是电力供应不足;三是农村生活用燃料,有 75% 靠生物质能。

我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。煤炭能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的占有量,只相当于世界平均数的 1/2,美国的 1/10,前苏联的 1/7。同时,我国人均能源消耗水平低,每年每人消耗约 0.7tce,为世界平均数 2.3tce 的 30%;远低于发达国家,也低于发展中国家。

我国能源以煤炭为主,在能源消费构成中占 70% 以上,而且在相当长的时期内不会有大的改变。而工业发达国家以消耗油、气为主,占到 70 - 80%。煤的发热值低,灰分高,燃烧效率低,尤其在直接燃烧时严重污染环境。

另一方面,我国能源利用率低,经济效益差。这可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》的报道,除前苏联以外 10 个经济大国,每生产 1 美元国民生产总值所消耗的能量如下:

法国	8791kJ	英国	14591kJ
日本	9797kJ	美国	20664kJ
意大利	10989kJ	加拿大	24454kJ
联邦德国	11304kJ	印度	26348kJ
巴西	11369kJ	中国	43394kJ

可见,我国单位产值能耗是法国的 4.9 倍,美国的 2.1 倍和印度的 1.6 倍。

主要工业部门中的钢铁工业:吨钢能耗是钢铁工业能源利用状况的重要标志。1994 年日本吨钢综合能耗为 0.656tce/t,而 1995 年我国钢铁行业吨钢综合能耗为 1.44tce/t,比日本高出

129.5%。我国有色金属产品的单位能耗远高于国外,据统计,铜、铅、锌的单位能耗比国外高 40% ~ 100%,铝高 30% ~ 80%。

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。在工业发展国家中,前苏联、日本、法国的供电煤耗较低。1983 年日本的供电煤耗为 335gce/kW·h,中国为 434gce/kW·h,比日本高出 29.6%。

建材工业:以水泥生产为例,1985 年中国每吨水泥熟料的能为 200.3kgce/t,比日本 1980 年每吨水泥熟料的能耗 121.1kgce/t 高出 65.4%。

化学工业:以生产合成氨为例,1985 年,中国合成氨吨氨能耗为 2.10tce/t,其中大型氨厂的吨氨能耗为 1.38tce/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 2.23tce/t,比国外先进水平高出 26% ~ 56%;小型氨厂的吨氨能耗为 2.37tce/t,比国外先进水平高 138%,也比本国大型氨厂高 72%。可见,中小型企业产品能耗更高一些,对其它工业部门情况也一样。

这样,我国总的能源利用率与工业发达国家相比有很大的差距,表 1-1 列出了中、美、日三国若干部门和总的能源利用率数据。

表 1-1 日本、美国、中国的能源利用率(%)

项 目 国 别	发 送 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

由表可见,日本的能源利用率为 57%,美国为 51%,而中国

仅 30%。差距是大的,尽管近年我国能源利用率提高了二个百分点,从另一方面讲我们的节能潜力又是很大的。按“九·五资源节约综合利用工作纲要”规定的能源指标是,每万元国内生产总值能耗由 1995 年的 3.93tce 下降到 3.19tce,累计节约和少用能源 3.5 亿 tce。

尤其应指出的是,由于我国以煤炭为主要燃料,而且利用效率较低,不但造成能源的巨大浪费,并且严重污染了环境。就全国范围而言,如果每年烧煤 6 亿 t 就有相当于 4 亿多 t 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 t 煤灰、渣,近 2000 万 t 粉尘以及 1000 万 tSO₂,平均在每平方公里上,每年要飘落 2t 粉尘,弥漫 1tSO₂。这些污染物质严重影响着中国的城镇,几乎所有的大、中型城市的大气含尘浓度都超过国家规定的标准,酸雨也时有出现。因此,在发展工业的同时,不断提高能源利用率,尽量减少对环境的污染,已成为一项刻不容缓的任务。

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。从我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,到 2000 年我国的一次能源的生产量只能达到 14 亿 tce,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,我国的能源形势是严峻的,能源仍是制约我国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,我国政府早在 1980 年就提出了“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。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。事实证明,我国的节能工作取得了较大

成绩,当然,还任重道远。

通常一个国家全部能源的使用分配可分为四个方面,即工农业(包括发电)、交通运输、商业和民用。我国用于工农业方面的能耗量占总耗量的百分比在 60% 以上,而美英等国为 40%。为使工农业(尤其是工业)能源有较高的利用率,一般可采用以下三种途径:合理安排能耗系统和改善管理;余热利用;采用新技术,包括新工艺、新设备等。因此,对余热进行合理的开发利用,对提高能源利用率、节约能源具有十分重要的意义。

1.2 余热和余热资源

1.2.1 余热的有关概念

(1) 余热(waste heat)以环境温度为基准,被考察体系排出的热载体可释放的热量,它包括实际上可利用和不可利用两部分热量。

(2) 余热资源量(quantity of waste heat resources)经技术经济分析确定的可利用的余热数量。

(3) 余热资源率(waste heat resources rate)被考察体系中余热资源量占相应供给能量的百分数。

(4) 余热资源回收率(recovery rate of waste heat resources)被考察体系中已回收利用余热资源量占余热资源总量的百分数。

(5) 余热利用率(utilization rate of waste heat)被考察体系安装余热利用装置后,被利用余热资源量占相应供给能量的百分数。

(6) 余热利用投资回收期(pay - back period of waste heat recovery)以回收利用余热取得的年净收益偿还余热利用装置投资费用所需的年限。

1.2.2 余热资源的分类

由于所考察的体系和工业设备千差万别,余热资源的数量、质量和形态各不相同,因此,要对余热资源进行全面、严格的分类是很难的。按余热载体形态划分余热资源种类是目前最常用的分类方法,可将余热资源划分为:

(1)固态载体余热资源即载热体以固态形式存在的余热资源,它包括固态产品和中间产品的余热资源、排渣的余热资源及可燃性废料。例如冶金工业炽烧的焦炭、烧结矿、焙砂、炉渣、连铸坯、初轧坯等固体所携带的余热,石化工业排出的油渣,各种炉窑排放的含炭量高的炉渣余热等都属于这一类余热资源。

(2)液态载体余热资源即载热体以液态形式存在的余热资源,包括液态产品和中间产品的余热资源,冷凝水和冷却水的余热资源及可燃性废液。

(3)气态载体余热资源即载热体以气态形式存在的余热资源,包括烟气的余热资源、放散蒸气的余热资源及可燃性废气。

也可按载热体的温度水平来划分余热资源种类。此时,可将余热资源分为以下三类:

(1)高温余热资源 即载热体温度高于 650°C 的余热资源。

(2)中温余热资源 即载热体温度为 $300 \sim 650^{\circ}\text{C}$ 的余热资源。

(3)低温余热资源 即载热体温度低于 300°C 的余热资源。

应指出,在不同的文献中对高、中、低温余热资源的温度标准是不同的,其原因是依据的原则与观察的角度不同。

此外,尚有其它的分类方法,如有的把余热资源分为以下六类。

(1)高温排烟余热 各种窑炉排出的 $650 \sim 1500^{\circ}\text{C}$ 的烟气余热等;

(2)高温产品、炉渣余热 焦炭、炉渣、钢坯、熟料等的物理热；

(3)可燃性的余热 高炉、焦炉煤气，造纸废液、城市垃圾等；

(4)冷却介质余热 汽化冷却蒸气和冷却热水等；

(5)废水、废液余热 电厂、锅炉等的废水、废液余热；

(6)化学反应中余热 化工、冶金中伴有化学反应的余热；

还应注意余热资源的其他特点，如余热资源是连续稳定的，还是间断波动的；余热资源的数量大小和分散程度；余热资源是洁净的还是含有粉尘；余热资源有无腐蚀、毒性等。当然，余热资源的这些特点通常与具体的体系和设备，运行方式以及燃料的种类有关。

1.2.3 余热资源等级

按余热资源回收利用的可行性与紧迫性，余热资源分为三个等级。一等余热资源应优先回收，二等余热资源应尽快回收，三等余热资源可视情况回收。

其等级划分原则是按余热利用投资回收期 and 余热利用率划分的，一般应以两判据中较高等级确定其相应等级。具体等级划分见表 1-2。

表 1-2 余热资源等级划分

余热资源等级判据 余热资源等级	余热利用投资 回收期 a(年)	余热利用率 %	常见余热资源举例
一等余热资源	< 3	> 10	650℃ 以上 高温烟气；建材窑炉中用于干燥坯料的低温烟气；可燃性废气、废液、废料；供热系统冷凝水

续 表

余热资源等级 余热资源等级判据	余热利用投资 回收期 a(年)	余热利用率 %	常见余热资源举例
二等余热资源	3~5	5~10	300~650℃ 中温烟气; 80℃ 以上冷却水
三等余热资源	>5	<5	300℃ 以下低温烟气; 500℃ 以上排渣

1.2.4 余热资源量计算方法

余热资源量是经技术经济分析可利用的那部分数量,正是按技术上可行、经济上合理的原则规定余热载体的下限温度。在作余热资源量统计时,规定的热载体下限温度见表 1-3。

表 1-3 余热载体下限温度

余热资源种类		余热载体下限温度℃
固体载体余热资源	固态产品、中间产品、排渣、可燃性废料	500
液体载体余热资源	液态产品、中间产品、冷却水、可燃性废液 冷凝水	80 环境温度
气体载体余热资源	烟气、可燃性废气 放散蒸气	200 100

应指出,在计算余热资源回收率时,凡余热利用设备排出的介质温度低于表中的下限温度时,其余热资源量的计算应按该排出温度为余热载体的下限温度。

余热资源量可按式计算:

$$Q_y = \sum_{i=1}^n m_i [Q_{d_i}^y + (h_{1i} - h_{2i}) \tau_i] \quad (1-1)$$

式中 Q_y - 年余热资源量, kJ/a

m_i - 第 i 种载体流量, kg/h 或 m^3/h

Q_{di}^v - 第 i 种载体的发热量, kJ/kg, kJ/ m^3

h_{1i} - 第 i 种载体在排出状态下的比焓 kJ/kg, kJ/ m^3

h_{2i} - 第 i 种载体在下限温度时的比焓 kJ/kg, kJ/ m^3

τ_i - 排出 i 种载体的设备年运行小时数, h/a

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ i 为载面体种类数目。

1.2.5 我国余热资源及其利用

中国的余热资源主要集中在表 1-4 所示的工业部门。

有色冶金炉气和炉渣的余热资源列于表 1-5 和表 1-6 中。

表 1-4 中国的余热资源

工业部门	余热种类	余热温度 $^{\circ}\text{C}$	设备举例
钢铁工业	焦炭显热	1050	炼焦炉
	烧结矿显热	650	烧结机
	燃烧排气余热	250 ~ 300	热风炉
	转炉煤气	1400	炼钢转炉
	低温水	50 ~ 70	高炉冷却水
铜精炼厂	气体余热	1200	铜精炼炉
	炉渣余热	1200	铜精炼炉
化工工业	气体余热	200 ~ 700	加热炉
	固体余热	1800	电石反应炉
工业锅炉	气体余热	150 ~ 300	工业锅炉
工业窑炉	气体余热	900 ~ 1500	玻璃窑炉
		600 ~ 700	水泥窑(干法)
		400 ~ 600	热处理炉
		200 ~ 400	干燥炉
电力工业	低温水	30 ~ 50	冷凝器排水
	气体余热	300 ~ 500	燃气轮机排气
轻工业 (食品、纺织)	气体余热	80 ~ 120	干燥机排气
交通运输	气体余热	300 ~ 400	蒸汽机车 内燃机车