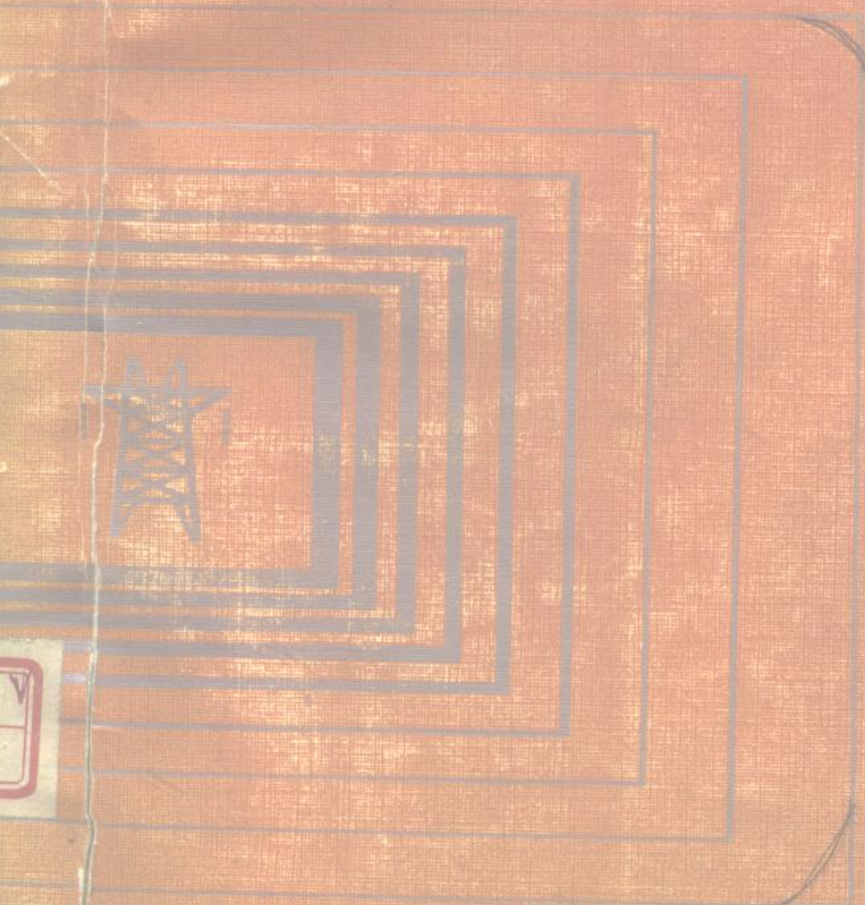


64)

余热发电

许萃群 编



上海科学技术出版社

余热发电

许萃群 编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

能源是工业生产的命脉,也是国民经济发展的重要条件之一。余热则是工业生产过程中大量产生的可资利用的热能。因地制宜地充分利用这些余热能量,实质上即达到节约与开发能源的目的。

本书就是从上述角度出发而介绍各种余热能源的种类与利用方法;部分典型工厂利用余热发电的情况;余热发电设备的选择、运行与维修;最后介绍在余热发电中所取得的点滴经验,供交流参考。

本书可供各工厂企业从事余热利用的有关干部与技术人员参考;也可作为余热发电培训学习材料。

余 热 发 电

许萃群 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 10.5 字数 230,000

1981 年 12 月第 1 版 1981 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—6,000

统一书号: 15119·2181 定价: (科五) 1.10 元

前 言

按人口平均的能源消费量，是衡量一个国家经济发展水平的重要标志。能源是保证国民经济高速度发展的重要条件之一，是工业生产的命脉。故必须大力加强能源的开发和节约。在节约方面，须加强能源管理，包括年综合能耗的定额管理，搞好热力平衡，降低能源消耗。

国际上把节约能源工作已列为“有效能”的能源开发。为此，提高我国能源利用率、节约能源是一个带战略性的任务。故合理地充分地利用能源，则是国民经济实行“调整、整顿、改革、提高”方针中一个重要的技术经济问题。我们不仅要节约一次能源，还需要重视利用工厂企业生产过程中的余热。而余热发电是当前提高二次能源利用率、节约能源和缩小电力缺口的有效措施之一。

编写这本书的目的是对开发各种余热能源用于发电的方法和经验，提供点滴素材与资料，作为引玉的抛砖。但限于编者的水平，缺点、错误在所难免，望广大读者批评指正。

本书是在常州市科学技术协会的领导下编写的，并蒙国内各有关工厂的干部、技术人员的大力帮助和支持才勉力完成。谨表示感谢。

许 萃 群

1981年5月1日

目 录

第一章 余热能源的概况	1
第一节 余热能源概述	1
第二节 余热能源的种类和利用方式	3
第二章 余热能源量估算和选择装机容量	9
第一节 余热能源量的估算	9
第二节 利用余热能源作为动力时装机容量的选择	17
第三章 余热能源利用与余热发电	21
第一节 余热能源利用	21
第二节 水泥厂利用余热发电	25
第三节 印染厂利用余压发电	30
第四节 小氮肥厂利用余热和余压发电	33
第五节 化工厂利用余热发电	42
第六节 冶炼厂利用余热发电	44
第七节 轧钢厂利用余热发电	46
第八节 钢铁厂利用多余煤气发电	49
第四章 余热发电设备的选择	57
第一节 余热回收设备	57
第二节 余热发电水处理设备	88
第三节 余热发电排烟除尘和净化装置	99
第四节 汽轮机	118
第五节 余热发电的热力系统	137
第六节 余热发电装置管道	142
第七节 电气设备	147

第五章 余热发电设备的运行	193
第一节 余热发电锅炉的运行	193
第二节 余热发电汽轮机的运行	222
第三节 余热发电的发电机运行	245
第六章 余热发电设备的维修	253
第一节 余热锅炉的维修	253
第二节 余热发电汽轮机组的维修	259
第三节 发电机的维修	283
第七章 余热发电中的点滴经验介绍	287
第一节 工业锅炉改造成发电锅炉的方法	287
第二节 锅炉内受热面积的增减方法	299
第三节 锅炉尾部受热面防止积灰和磨损的方法	302
第四节 空气预热器除灰的方法	306
附 录 参考数据	314

第一章 余热能源的概况

第一节 余热能源概述

“余热”也称“废热”，在科学上属于“二次能源”。煤、石油、天然气……等等从地下开采出来或地上的自然能源，属于“一次能源”。从工农业、交通、民用等部门利用各种机械设备和化学反应设备所产生出来的能源，如余热、电、人造煤气、沼气、氢、氧、乙炔等都属二次能源。化学反应也是一种化学能，各种机械设备的运行也离不开机械能与电能、热能。各种能又可相互转化、变换。

余热是工业生产中潜力分布面最广大的一种能源。利用余热可节约大量燃料；节省运输；减少大气污染；改善劳动条件；节省占地面积；增加产量；提高质量；增加副产品；降低成本等等。据 1978 年粗略的估计，全国工业余热能源的总量，大约相当于 3300 万吨标准煤的热量，可以回收利用的约为 2000 多万吨标准煤的热能。随着生产的发展和燃料消耗量相应的增加，工业余热能源的数量必然要大大地增加。即以 2000 多万吨标准煤热量的余热能源为例，如果全部以蒸汽的形式回收利用，就相当于每年 2 亿吨余热蒸汽。这些蒸汽假使以热效率平均为 70% 的锅炉生产的话，就要消耗 2900 万吨标准煤，折原煤 3600 万吨。如采用综合利用余热蒸汽的方式，可节省的燃料还要增多。例如：全国若有一半的余热，即 1 亿吨高压余热蒸汽，在供给生产、生活用汽以前，先通过背

压式汽轮机带动发电机发电,就可代替大量动力或发电100亿度,相当于115万千瓦发电功率。这些电力如由其它火力发电厂供应,就要消耗450万吨标准煤(以发电煤耗率0.45公斤/度计算)。

利用余热还可以节省大量投资。例如:建设一台蒸发量为1吨/小时的余热锅炉,约需投资16000~22000元,而建设同等容量的烧煤锅炉,则需投资约15000元。因此,粗算一下每台余热锅炉似乎要多花投资1000~7000元,但是每台每年却可节省标准煤约1000吨,这相等于节省煤矿投资70000元(以目前大型煤矿平均投资70元/吨计算);而总的来看,建立一台1吨/小时余热锅炉,就可为国家节省投资65000元左右。由此可见,如目前全国余热能源全部回收利用,至少每年就可节省国家投资15亿元。这是一个很可观的数字。

总之,充分合理利用我国的余热能源,这对加速我国社会主义建设和实现四个现代化是具有极重要的积极意义。

国外从40年代前就开始进行余热利用的研究。近年来由于“能源危机”,美、苏、日、法等国对余热利用已不得不更给予重视,大量投资进行科研工作。其中日本对工业余热的回收利用,主要是从50年代开始才发展起来的。它是作为“热管理”的重要项目之一,从而使热设备的效率提高;单位产品的能源综合消耗定额下降;工业余热回收利用技术也有了相应的发展。

近年来,国际上把节约能源工作已列为一项“有效能”的能源开发,并称为是继煤、石油、天然气、水力和核能之后的重要能源。开发“有效能”,不仅是指节约使用一次能源的问题,还有充分使用二次能源的问题。

如果从世界能源利用的历史来看,1860年利用率只有

10%，1950 年为 28%，1970 年已达到 50%。为此开发“有效能”是极有经济价值的事。现在国外有效能可达到 40~57%。我国大小电厂平均热效率只有 19~25%，全国各大小企业平均计算燃料利用率只有 28%。如果我国燃料利用率达到国外水平，也就相当于原煤产量增加一倍，同时相等于燃料的运输量以及其它有关投资将大大减少，环境污染也将大为改善。

总之，国外对有效能的开发利用除了 50 年代发展的余热锅炉等高温热能回收利用外，还在向低温余热转换为电能或机械能发展。众所周知，根据能量守恒定律，能量从一种形式转变到另一种形式时做功，其能量是不会减少的。但实际上包括不可避免的一定损耗。因此问题是我们如何设法减少转变过程中的损耗，以及将转变后的各种形式的能量充分回收加以利用。在这方面是大有文章可做，而且发展前途也是无限的。

第二节 余热能源的种类和利用方式

工业余热能源的种类和形式很多，按照它产生的来源，大致可分以下六类：

一、高温气余热的利用

这种余热数量最大，分布最广，它占余热资源总量的一半左右，分布在冶金、化工、机械、建材、玻璃、搪瓷、陶瓷、电力等行业。工业各种窑炉的高温烟气余热大约相当于窑炉本身燃料消耗量的 30~40% 以上。它的用途有以下三种利用方式。

1. 直接利用方式

直接用高温（多数为 500~1000℃）的烟气来加热物体。

例如：预热入炉空气、燃料、物料或进行干燥、退火处理等。这几种用途我国都已采用。

2. 间接利用方式

它是用高温烟气先去加热其它介质(如水、空气等)，然后把加热了的介质供各种用途使用。例如：高温烟道中安装余热锅炉，产生蒸汽用来发电，或者通过热交换器产生热水和热空气。

3. 综合利用方式

一种余热同时作两种以上用途的叫余热的综合利用。例如：利用高温烟气余热同时预热入炉空气和煤气；或同时预热空气、煤气并且还余热锅炉产生蒸汽发电等等。这种方式国内外都采用。

二、高温产品和炉渣余热的利用

工业上许多生产要经过高温加热过程，例如：金属的冶炼、熔化和加工；煤的气化和炼焦；石油炼制；烧水泥、砖瓦、耐火材料、玻璃、搪瓷、陶瓷等等。因此，它们最后出来的产品及其炉渣废料都具有很高的温度，含有大量余热。这些产品有固体、液体和气体，一般都要冷却到常温才能使用，在冷却过程中就有大量的热能损失。这种余热我国已有不少被利用，特别是建筑材料、石油炼制和冶金工业利用较多，但还有很多尚未被充分利用。其用途大致和高温气余热差不多。

三、冷却介质余热的利用

冷却介质的余热约占余热总量 20% 左右。各种冶金炉的冷却余热大约占本身燃料消耗量的 10~25%；冷凝式发电厂占其燃料消耗量的一半。

冷却余热大致有几种：汽化冷却产生的蒸汽用来发电；热水用于生活；热空气用于生产。

四、废汽、废水余热的利用

这种余热凡是使用蒸汽和热水的工厂部门都有，它约占余热总量 10% 以上。

废汽、废水余热有几种：

(1) 各种蒸汽动力机械的排汽，这种废汽压力约为 1.2~1.4 大气压；

(2) 二次蒸汽在化工、轻工、食品等工业中由于蒸发、浓缩等过程中产生的，它的压力接近于 1 个大气压；

(3) 蒸汽冷凝水和锅炉排污水，温度约 90~100℃；

(4) 其它废热水，例如：纺织、食品、洗染、浴室等在生产和使用过的废热水，温度一般不高，约在 30℃ 以上。这种热水大多是脏水。

五、化学反应余热的利用

这种余热主要存在于化工行业，是一种不用燃料而产生的热能。它占余热总量 10% 以下。它的应用分为：直接利用方式，即把化学反应热用于反应本身；间接利用方式，用反应热产生蒸汽和热水、热空气。例如：制造硫酸过程中利用焚硫炉或硫铁矿石沸腾炉产生的化学反应热，以加热余热锅炉产生的蒸汽用来发电。

六、可燃废气、废液和废料余热的利用

这种余热约占总量 8%。它的应用如下：

1. 直接利用方式

转炉废气直接用作化工原料和燃料，炼油厂废气直接用作燃料。

2. 间接利用方式

利用转炉高温废气的热量，在烟道上装余热锅炉产生蒸汽和热水。

3. 综合利用方式

由于可燃废气一般既含有化学潜热,又含有物理显热,有的还具有一定动力,所以综合利用这种余热很适合。例如转炉高温废气先通过余热锅炉产生蒸汽,然后把它用作化工原料或燃料。

总之,余热利用的方式途径很多,一般来说,综合利用余热的方式最好,其次是直接利用的方式,第三是间接利用(产生蒸汽、热水和热空气)的方式。根据这个原则,凡能够做到综合利用的,应该首先考虑,然后再考虑直接利用;否则,就考虑采用间接利用的方式。

关于间接利用方式中余热产生的蒸汽、热水和热空气的利用情况再分述如下:

1. 余热蒸汽的利用

余热蒸汽有高压、低压两种。高压蒸汽的用途和烧煤锅炉产生蒸汽用途完全一样,有生产工艺用、生活用、动力用、发电用、综合利用五种;低压蒸汽的用途基本上和高压蒸汽用途一样,但也有区别。由于低压蒸汽压力低,所以它不能远距离输送,不能通入蒸汽网,只能就近使用。为了充分利用低压蒸汽,在一定情况下可以采用热力变压设备提高压力。

余热蒸汽合理利用的方案有:动力、生产、生活联合利用(动力、供热联合利用);发电、生产、生活联合利用(发电、供热联合利用);生产、生活一汽多用;生产工艺用;生活用;单纯发电用(冷凝式机组)等六个。

动力、供热联合利用方案是利用高压余热蒸汽先通过背压式汽轮机代替电动机,然后再把排汽供生产、生活用热需要。它既可取消锅炉,又可取消电动机、设备、燃料还节省电力,是最合理的一种利用方式。凡是能够采用这种利用方式

的工厂(如化工、冶金、炼油、机械厂等)在新建设时都应采用这种方式,有条件改造的也建议采用这种方式。

发电、供热联合利用方案是利用高压蒸汽先通过背压式或抽汽式汽轮机发电后,再把排汽供应各种热需要。它比其它单一利用都要好,燃料节约量比单供热方案多15%,比单发电多80%,投资和运行费用也省。

生产、生活一汽多用,生产工艺用,生活用三方案,由于有季节性影响,冬天用得更多,夏天用得少,所以利用效果差。

至于单纯发电用方案,因小型冷凝式发电效率很低,所节约的燃料最少,而投资和运行费却最贵。所以除了本厂和附近都没有用汽单位的情况下,才考虑用冷凝式发电方式,一般不宜采用。

上述生产、生活和生产工艺三种用途,目前国内采用较多。这主要由于余热蒸汽压力不高的缘故,而现在已发展了中压余热蒸汽(40大气压),这样就有条件采用前两种综合利用的方案。

2. 余热热水的利用

余热热水有二种:一是高温热水,温度在 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 以上,如:蒸汽冷凝水、锅炉排污水、高温炉渣水、高温冷却水等属于这一类;另一是低温水,如电厂低温冷却水,温度只有 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 左右。

高温热水的用途主要是生产工艺用;送回锅炉用;生活用;产生蒸汽(通过热泵使热水变蒸汽)和动力发电用(通过扩容法,低沸点介质、温差等办法)。目前国内主要利用的是前三种,后两种新途径尚需要进行科学试验,总结新的、成熟的经验。

低温热水由于温度低,有的还是污水,因此利用它受很大限制。为了利用大量低温水的余热,可以采取(如用热泵,渗入蒸汽,降低电厂冷凝器的真空度等)来提高热水温度,然后供给生产、生活应用。

低温热水如果不是污水,则可以直接利用在农、渔业上,如培养绿萍肥或用来养殖非洲鲫鱼等鱼类。

3. 余热热空气的利用

余热热空气最适宜供给生产(如干燥)常年使用,其次给暖气空调用。至于通过空气轮机作为动力和发电应用尚在研究之中。

余热能源在各行各业中以冶金业为最多,它可利用的余热约占其燃料消耗量的 $\frac{1}{3}$; 机械业约占 15% 左右; 化工、玻璃、搪瓷业占 15% 以上; 造纸、木材业占 17%; 纺织业占 10% 左右; 建筑材料、砖瓦业(轮窑)占 40%。总之,余热的潜力是十分巨大的,几乎各行各业都有余热可利用或因地制宜试行余热发电,这也是节约增产的有效措施之一。

第二章 余热能源量估算和 选择装机容量

第一节 余热能源量的估算

根据上一章介绍的六种工业余热能源的特点，可先计算出某余热能源的余热总量，然后求出可回收利用的余热量，再乘上设备年工作小时数，就可以求出全年回收利用的余热量。

兹将六种工业余热能源的基本计算公式和简单举例说明如下：

一、高温气余热能源的估算

$$1. Q_{ey} = B \cdot V_y \cdot t_y \cdot C_y$$

式中： Q_{ey} ——每小时高温烟气的总余热量，单位大卡/小时；

B ——每小时燃料消耗量，单位公斤/小时(固体或液体)；单位标米³/小时(气体)；

V_y ——燃烧每公斤(固体或液体)或每立方米(气体)燃料所产生的烟气量；数值可以实测或由表2-1~2-3查得，单位标米³/公斤(固体或液体)或标米³/标米³(气体)；

t_y ——烟气温度，可实测，单位℃；

C_y ——烟气平均比热，可从表1-4查得。

$$2. Q_{vy} = Q_{ey} \frac{t_y - t_p}{t_y}$$

式中: Q_{yy} ——每小时可回收利用的余热量,单位大卡/小时;

t_p ——排烟温度,单位 $^{\circ}\text{C}$,指不好利用的烟气温度的。

如一般余热锅炉排烟温度为 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$; 轮窑用烟气干燥砖坯的排烟温度可取 40°C 。

$$3. Q_{yn} = Q_{yy} \cdot H$$

式中: Q_{yn} ——全年可回收的余热量,单位大卡/年;

H ——设备全年工作小时数,单位小时。

【例】某厂有一台轧钢加热炉,每小时消耗重油1000公斤,烟气温度 800°C ,设备全年工作6000小时。

先由表2-4查得烟气温度的 800°C 时的烟气平均比热 C_y 为0.364大卡/标米 $^3\cdot^{\circ}\text{C}$;查表2-2取过剩空气系数 α 为1.20,重油热值 Q_H^p 取9500大卡/公斤,则燃烧每公斤重油产生的烟气量 V_y 为12.56标米 3 。

由此:

$$1. Q_{yy} = 1000 \times 12.56 \times 800 \times 0.364 = 3.65 \times 10^6 \text{ 大卡/小时} \\ = 3.65 \text{ 百万大卡/小时。}$$

$$2. Q_{yy} = 3.65 \times 10^6 \times \frac{800 - 250}{800} = 2.51 \text{ 百万大卡/小时。}$$

$$3. Q_{yn} = 2.51 \times 10^6 \times 6000 = 15060 \text{ 百万大卡/年。}$$

(注:烧煤、烧煤气加热设备的余热量计算与上述相似)

二、冷却介质余热能源的估算

冷却水

$$1. Q_{zs} = G_s \cdot t_s \cdot C_s$$

式中: Q_{zs} ——每小时冷却水的总余热量,单位大卡/小时;

G_s ——每小时冷却水量,可实测,单位公斤/小时;

t_s ——冷却水温度,从实测而得,单位 $^{\circ}\text{C}$;

C_s ——冷却水比热,一般取1,单位大卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

$$2. Q_{ys} = Q_{zs} \frac{t_s - t}{t}$$

式中: Q_{ys} ——每小时从冷却水可回收利用的余热量,单位大

卡/小时;

t ——冷水温度,指普通河水、井水、自来水的常温,
一般可取 20°C (年平均数)。

汽化冷却

$$1. Q_{zq} = D_q \cdot i_q$$

式中: Q_{zq} ——每小时汽化冷却总余热量,单位大卡/小时;

D_q ——每小时汽化冷却产汽量,单位公斤/小时;

i_q ——蒸汽的热焓量,根据蒸汽的汽压和汽温从蒸汽表上查得,单位大卡/公斤。

$$2. Q_{yq} = Q_{zq} \frac{i_q - i_s}{i_q}$$

式中: Q_{yq} ——每小时从汽化冷却可回收利用的余热量,单位大卡/小时;

i_s ——冷水的焓,即每公斤冷水在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的热量,

$i_s = t$ 大卡/公斤。

【例】某装置冷却水温度为 50°C , 每小时冷却水流量为 10000 公斤,设备全年工作 5000 小时。

1. $Q_{zq} = 10000 \times 50 \times 1 = 0.5 \times 10^6$ 大卡/小时 = 0.5 百万大卡/小时。

$$2. Q_{yq} = 0.5 \times 10^6 \times \frac{50 - 20}{50} = 0.3 \text{ 百万大卡/小时。}$$

$$3. Q_{yn} = 0.3 \times 10^6 \times 5000 = 1500 \text{ 百万大卡/年。}$$

【例】某轧钢厂加热炉汽化冷却每小时产汽 10 吨,饱和蒸汽汽压为 7 公斤/平方厘米,设备全年工作 6000 小时。

从饱和蒸汽表查得,7 公斤/平方厘米汽压时,饱和蒸汽焓为 660 大卡/公斤。

$$1. Q_{zq} = 10000 \times 660 = 6.6 \text{ 百万大卡/小时。}$$

$$2. Q_{yq} = 6.6 \times 10^6 \times \frac{660 - 20}{660} = 6.4 \text{ 百万大卡/小时。}$$

$$3. Q_{yn} = 6.4 \times 10^6 \times 6000 = 38400 \text{ 百万大卡/年。}$$