



余热
回收

YUREHUISHOU

天津科学技术出版社

余热回收

霍光云 编

天津科学技术出版社

责任编辑 乐琳

余热回收

霍光云 编

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷四厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 8.875 字数 184,000

前 言

能源的开发与节约并重，近期要把节能放在优先地位，大力开展以节能为中心的技术改造和结构改革，这是一条符合我国实际情况的解决能源紧张状况的正确途径。在现阶段，节能工作的重点要放在发展耗能少的工业，降低单位产品能耗，改进不合理的工艺流程，改造落后设备，采用新技术以及合理回收利用余热资源等几个方面，争取尽快地把能源利用率提高到新的水平。

本书的内容以应用和实例为主，从理论上和实际上探讨了中小型企业进行技术改造、回收利用余热资源的可能性和经济性以及有关余热回收的现代技术装备。同时，对工程热力学的基本理论也作了扼要的叙述。

本书还汇编了一些图表，并介绍了国内外不同行业利用余热的部分技术措施，作为余热回收设计时的参考。这些实例的来源不一，所以计算方法也不尽相同。同时，为了阅读方便，能量单位力求采用公制，但部分实例，由于内容的需要，仍不得不采用英制单位和外国币值。为此，在附录中列举了一些与热能利用有关的单位换算方法，以便于读者对照使用。

编写本书的目的是想尽可能地普及余热利用方面的基本知识，以达到提高经济效益和节约能源的目的。鉴于作者的水平有限，错误之处在所难免，希望读者批评指正。

编 者

内 容 提 要

本书共分六章。第一章以具体的例子说明余热资源的广泛存在与回收利用的可能性；第二章从理论上对回收工业余热的数量、质量问题作深入一步的探讨；第三章介绍利用热平衡与焓平衡来确定回收余热资源经济价值的方法；第四章对余热回收工程的技术经济性与节约能源的关系进行综合分析，并对经济效益评价提出几种估算的方法；第五章简单介绍有关回收余热的现代技术装备及其一般特性；第六章重点列举国内外一些中小型企业对原有设备进行改造回收生产余热的实例。附录中的一些图表可供设计余热回收装置时参考。

本书内容注重实用，浅显易懂。适于工厂企业中具有中等文化水平的领导干部、管理人员、技术干部和工人阅读。

目 录

第一章 余热资源与余热利用

一、余热的存在	(1)
二、余热的分类	(5)
三、余热的利用	(8)
1. 高温余热的回收	(8)
2. 中温余热的回收	(9)
3. 低温余热的回收	(9)
4. 余热回收的一般途径	(12)

第二章 工程热力学基础和传热学原理

一、工程热力学基础	(15)
1. 热力学第一定律	(15)
2. 热力学第二定律	(20)
3. 焓——热能的可用性	(24)
二、传热学原理	(30)
1. 热传导	(30)
2. 对流换热	(31)
3. 辐射换热	(33)
4. 复杂换热	(37)
5. 传热基本方程式和传热系数计算式	(38)

第三章 热能测试与合理利用

一、有效利用热和余热	(40)
二、热平衡测定	(43)
1. 设备热平衡	(45)
2. 企业热平衡	(52)

三、烟平衡	(61)
四、热能的合理利用	(66)
1. 热能的重复利用	(66)
2. 热能动力与电动力力的比较	(69)

第四章 余热回收工程的综合经济效益分析

一、效益与费用	(73)
二、分项估价	(76)
1. 偿付法	(76)
2. 投资回收率	(77)
三、综合估价	(77)
四、确定最佳方案的方法	(82)
1. 净现值(纯收益)法	(82)
2. 净年值(纯年收益)法	(85)
3. 收益/费用比值法	(87)
4. 内回收率法	(87)
五、估价方法的应用	(88)

第五章 余热回收的热能转换装置

一、换热器	(90)
1. 换热器的分类	(90)
2. 常用换热器的性能	(92)
3. 换热器设计热力计算示例	(103)
二、余热锅炉	(111)
1. 余热锅炉的特点	(111)
2. 余热锅炉的分类	(113)
3. 余热锅炉的热源	(119)
4. 余热锅炉的热力计算	(120)
三、热管	(122)
1. 热管的工作原理与结构	(122)

2. 热管的分类与制造材料	(124)
3. 热管的应用	(134)
四、热泵	(138)
1. 热泵的工作原理	(140)
2. 热泵的类型	(142)
3. 工业热泵	(142)

第六章 余热回收装置选用实例

一、轧钢加热炉烟气余热利用——余热锅炉	(149)
二、染纱厂冷凝水余热回收	(153)
三、玻璃窑池利用烟囱同流换热器回收余热	(153)
四、回转锻造炉辐射换热器余热回收	(162)
五、罐头厂制罐烃烟焚烧炉余热回收	(166)
六、沥青油毡厂余热锅炉回收余热	(168)
七、橡胶厂热管预热空气调节装置	(172)
八、涂漆烘干炉热管回收废热	(174)
九、热泵回收工业余热生产热水	(176)
十、热处理炉辐射换热器回收余热	(180)
十一、热轮(回转换热器)回收余热装置	(182)
十二、陶瓷热轮回收烟气焚烧的余热	(184)
十三、玻璃厂小型锅炉增装省煤器	(187)
十四、高级旅馆及餐厅空调设备余热利用	(189)
十五、乳酪厂利用锅炉排烟为仓库供热	(192)

附 录

附录一 有关的计算图

1. 燃料燃烧产物的理论露点	(196)
2. 加热炉排烟温度与燃料节约	(196)
3. 换热器预热空气温度与回收热量	(197)

4. 回收排烟余热节约燃料费用	(198)
-----------------------	-------

附录二 单位换算

1. 一般单位换算	(200)
2. 导热系数及传热系数单位换算	(201)
3. 发热量单位换算	(202)
4. 比热单位换算表	(203)
5. 热负荷单位换算	(203)
6. 容积热负荷单位换算	(204)
7. 水的硬度单位换算	(204)
8. 能量单位换算	(205)
9. 功率单位换算	(205)
10. 流速单位换算	(205)
11. 流量单位换算	(205)
12. 压力单位换算	(206)
13. 温度单位换算	(206)
14. 粘度单位换算	(207)
15. 动力粘度单位换算	(209)
16. 运动粘度单位换算	(209)
17. 常压下气体的动力粘度与运动粘度	(208)
18. 常压下水的运动粘度	(212)
19. 不同压力下水的动力粘度	(212)
20. 雷诺数 Re 线算图	(213)

附录三 物质的热物性

1. 理想气体的比热	(214)
2. 气体的比热	(214)
3. 常用气体定压摩尔比热与温度的关系式	(217)
4. 常用材料的导热系数	(218)
5. 建筑及保温材料导热系数	(218)
6. 水的热物性	(220)
7. 水蒸气的导热系数	(221)
8. 烟道气的导热系数	(222)
9. 空气的导热系数	(222)

10. 焦炉气的导热系数	(224)
11. 天然气的导热系数	(224)
12. 高压下水的导热系数	(225)
13. 几种液体的热物性	(225)
14. 常压下气体的导热系数	(226)
15. 干空气在压力等于760毫米汞柱时的物性参数	(229)
16. 烟气在压力等于760毫米汞柱时的物性参数	(230)
17. CO_2 在饱和状态下的热力性质	(230)
18. NH_3 在饱和状态下的热力性质	(232)
19. 湿空气参数的定义	(235)
20. 湿空气的热力性质 (在760毫米汞柱下)	(237)
21. 湿空气的焓湿图	(243)
22. 常用材料的热物性	(244)
23. 水在1个大气压或饱和线上的物性参数	(246)
24. 水蒸气在饱和线上的物性参数	(248)
25. 饱和水和饱和蒸汽的焓	(249)
26. 过热蒸汽的焓	(253)
27. 空气的焓	(257)
28. 空气和烟气受迫运动时的放热系数	(259)
29. 水沸腾时的放热系数	(260)
30. 过热蒸汽在管内流动时的放热系数	(261)
31. 蒸汽凝结时的放热系数	(262)
32. 热表面在空气中的对流放热系数及放热量	(263)
33. 传热系数线算图	(264)
34. 对数平均温差线算图	(265)
35. 不保温管道的散热量	(266)
36. 保温管道的散热量	(267)
37. 管道保温层厚度线算图	(268)
38. 管道保温层的经济厚度	(269)
39. 不同管径的管道保温层极限厚度	(273)

第一章 余热资源与余热利用

在工业生产中，很多方面已经采用了一些新工艺、新技术和新设备，相应地降低了热能的消耗。但是在生产过程中由煤、油、天然气等一次能源所转化出来的热能，只有一部分得到了有效的利用，还有相当一部分热能——余热在燃烧或加热之后没有被充分利用而浪费掉了。因此，一般来说，根据排放掉的剩余热能的数量便可估计出热能利用率的高低。

目前，我国的能源利用率是不高的；平均还不到30%。而在一些较发达的国家里，已达40%以上，甚至有的已经超过了50%。

当然，能源利用率的高低与生产设备的先进和落后、工艺流程是否合理、设备的完好情况，维护保养工作的好坏以及能源管理工作的水平都有关系。但是要看到，在工业生产的燃烧或加热过程中，不可避免地要有种种余热被排放出来。因为有的余热不排放出来，就达不到生产工艺的要求。从节能和提高能源利用率的角度来看，合理地回收和利用余热，不仅是十分必要的，而且也是完全可能的。但这并不是说，对所有的余热都要全部加以回收。第一，这既没有科学根据，技术上也不可能；第二，回收多少，必须进行综合经济效益分析才能决定。所以，合理而充分地回收余热资源，才能达到迅速提高能源利用率的目的。使余热得到再次利用，就称做“二次能源”。

一、余热的存在

提起余热，马上会联想到许多生活上的经验，譬如冬天室内用炉子做饭，再给炉子加上几节烟筒，就可以利用烟气里的余热

给房间加温取暖；农村中的柴灶也是又做饭烧水又烧炕暖房；还有，在较大一点的食堂里，可以看到一种一火多用的多眼灶，它利用火焰和烟气不同部位的温度，形成旺火、中火、微火、烟温等不同的功能，达到爆炒、烹炸、蒸煮、煨燉、预热等不同的目的。这就是我们日常生活中多方面地利用燃料燃烧转化出来的热能的一些简单措施。尽管如此，我国生活方面的热能利用率还是很低的，经过测定，燃烧蜂窝煤的热效率不过是30%左右，烧煤球或煤饼的热效率只有20%，而使用散煤就更低了，只有10%左右。当然，在生活上使用现在这样的简单燃烧和加热装置，想大幅度提高热能利用率是相当困难的。在工业生产上，当前同样普遍存在着浪费掉的燃料热量比实际使用的热量大得多的极不合理现象。既没有把燃料燃烧应该产生的热量全部发挥出来，也没有使发挥出来的热量得到充分利用，以致造成能源的严重浪费。

在广泛而大量地使用常规能源的情况下，不论在工业生产上还是在生活中，余热资源是大量存在的。

譬如，火力发电厂的发电过程是利用高温、高压的蒸汽来推动汽轮机并拖转发电机来发电的。汽轮机耗热量的多少，与进、出汽轮机的蒸汽压力和温度的差值有关，差值越大，表示做功发电的效率越高。一般汽轮机尾部排出来的物质仍然是蒸汽的形态，其温度只有30℃左右，压力仅为0.04大气压。但是，为了要把排出的蒸汽变成水，以便送回锅炉再使用，就要在汽轮机尾部造成一个真空度为96~97%的低压，来加大蒸汽进、出口参数的差距，并且还要用比蒸汽量大五、六十倍的冷却水把蒸汽中很大一部分汽化潜热吸走。这样一来，由于尾部排出物突然由汽态变成液态，体积急剧缩小，造成了一个接近真空的状态，从而达到了回收凝结水和利用蒸汽热量的最大变化来做功发电的目的。这个过程如图1-1所示。

可是，这股冷却水从每公斤蒸汽中吸走了四、五百千卡的热量，带着35℃左右的余热被白白地排放掉了。这部分余热一般占

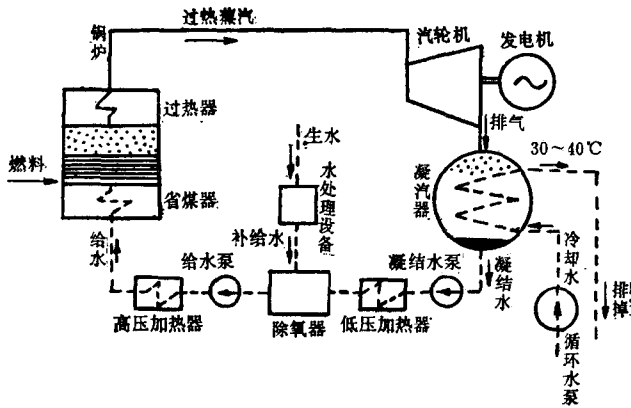


图 1-1 发电厂热力循环和余热排放示意图

发电总热量的50~60%，再加上其它的热损失，使发电的总热效率只有25~40%左右。损失的热量（尤其是被冷却水带走的余热）比有效利用的热量大得多。从表1-1可以看出热量损失的情况。

各种工业加热炉、热处理炉等炉窑在冶金和机械制造行业里是很多的，如轨钢加热炉、锻造加热炉、化铁炉、退火炉、正火炉、渗碳炉等。在这些不同类型的炉子里，被加工的金属物料基本上是不发生化学变化的，只是把它们的温度升高或使其熔化而已。根据锻造工艺的要求，物料在吸收热量之后，从炉内取出，趁热进行锻打，此时物料必然带有热量，利用它的高温展、延、塑性加工成形，但是热量却随着锻打而散去。热处理工艺则要求物料在炉子里进行升温、蓄热、恒温、降温、冷却等一系列工艺过程，一般要等完全冷却后才能出炉。在这些工业窑炉的加热过程中，为了要保持相当高的温度，不得不随时添加燃料来维持稳定的燃烧，以满足工艺上的要求，然而燃烧生成的高温热炉烟却带着很多的热量不断地被排放掉。排放的热炉烟温度一般都在摄氏四、五百度，甚至上千度。这不仅浪费了能源，而且也对环境

表 1-1

发电厂的热量损失

项 目	中温、中压 电厂	高温、高压 电厂	超高压电厂 (中间再热)	超临界压力 电厂 (中间再热)	说 明
锅炉热损失(%)	11	10	9	8	这四项损失主要与机组容量有关,较大的机组损失的百分数较小,表中所列数据为粗略的平均值
汽轮机的机械损失(%)	1	0.5	0.5	0.5	
发电机损失(%)	1	0.5	0.5	0.5	
管道系统损失(%)	1	1.0	0.5	0.5	
汽轮机排汽热损失(%)	61.5	57.5	52.5	50.5	冷却水带走余热
总损失(%)	75.5	69.5	63	60	
发电效率(%)	24.5	30.5	37	40	

造成了污染。如果这种余热不加以回收和利用,显然是不合理的。图1-2所示为玻璃窑池排放余热的情况。

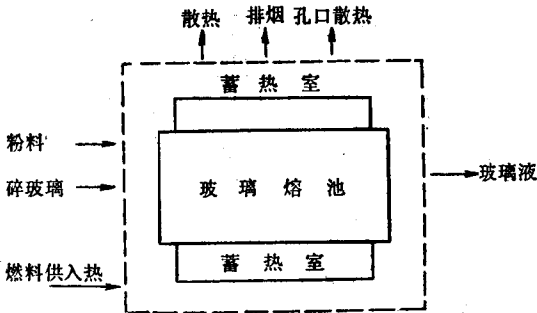


图 1-2 玻璃窑池余热排放示意图

同样,炼铁的过程也是如此。炼铁炉里焦炭的燃烧是一个放热反应,它把原料加热到熔融状态。铁矿石从焦炭的燃烧中吸取热量,进行还原反应。矿石、焦炭和助熔剂经过一系列的变化,最后成为铁水和高温状态的炉渣以及含有可燃一氧化碳气体的高

炉气。这里，有效利用的热是铁矿石等物料的升温、熔化和发生化学反应时所吸收的热量。其中，炉内铁水所含的余热是可以得到重复利用的，而大量的高温炉渣和可燃的高炉气余热，却需要通过附设的余热回收装置进行回收，或者利用它们的再

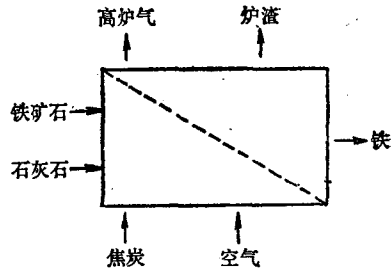


图 1-3 炼铁炉余热排放示意图

燃烧特性使之继续放出热来加以利用，否则，这些热量就将白白损失。图1-3所示为炼铁过程的余热排放情况。

二、余热的分类

从上面叙述的情况来看，由于燃料在燃烧或加热的过程中，会同时伴生出种种不同形式的余热来。如果合理地回收和利用这些余热，就可充分地发挥出燃料的作用，从而提高生产过程的总热效率。

“余热利用”这个概念可以这样来认识，就是从某一个生产过程中所排放出来的热量具有相当的温度（一般高于环境温度），并能利用其中一部分热量进行再生产，从而提高热能利用率。

余热可根据它所具有的温度来分类。工业余热一般可分为三类：

- (1) 高温余热：高于 500°C ；
- (2) 中温余热：介于 500°C 至 300°C 之间；
- (3) 低温余热：低于 300°C 。

一般碳氢化石燃料的燃烧产物温度均在高温范围内，在大气压力下的燃烧装置里，它的最高理论燃烧温度可达 1900°C 左右，但在实际的装置中测到的火焰温度却在 1650°C 以下，这是由于二

次空气和其它的一些冷却介质进入炉内所致，这正是保持生产过程和保护炉体结构所需要的温度。由于实际燃烧温度比理论温度要低一些，所以高温余热的温度也相应地低一些，实际生产过程中最高的排放温度在1100~1200℃左右。

低温余热的来源有两个：一是有的余热在排放时本身的温度就是低的；二是在高、中温余热回收中，仍然会有剩余的低温余热被排出来。

表1-2所列是各种工业生产装置中燃料直接燃烧所排放出来的高温气体余热的温度。

表 1-2 高温气体余热排放温度

燃烧装置形式	温 度 ℃
镍 精 炼 炉	1350~1650
铝 精 炼 炉	650~750
锌 精 炼 炉	750~1100
铜 精 炼 炉	750~810
钢 加 热 炉	920~1050
铜 反 射 炉	900~1100
平 炉	650~700
水 泥 窑 (干 法)	620~730
玻 璃 熔 炉	980~1550
制 氢 厂	650~980
固 体 垃 圾 焚 烧 炉	650~980
气 体 焚 烧 炉	650~1400

表1-3是从不同生产装置中排放出的中温余热温度。它们大部分是燃料在装置中直接燃烧后排出的。由表列温度可以看出，利用这些中温余热的一部分热量来做功是完全可能的，如热处理炉或干燥、烘干炉的排烟可送给燃气轮机继续使用。

表 1-3 中温气体余热排放温度

热能装置	温度 ℃
锅炉排烟	230~480
燃气轮机排气	370~540
往复式蒸汽机排汽	320~600
涡轮蒸汽机排汽	230~370
热处理炉排烟	430~650
干燥、烘干炉排烟	230~600
催化裂化装置	430~650
退火炉冷却系统	430~650

表 1-4 低温余热的来源及温度

余热来源	温度 ℃
汽轮发电机的循环冷却水	30~40
生产过程中的蒸汽凝结水	55~90
冷却水	
来自：炉门	30~55
轴承	30~90
焊机	30~90
喷铸机	30~90
退火炉	65~230
冲模	25~90
空气压缩机	25~50
水泵	25~90
内燃机	65~120
空调和制冷凝结水	30~45
液体蒸馏器凝结水	30~90
干燥、烘干、硫化炉排水	100~230
生产过程的热流体	30~230
生产过程的热固体	100~230