

[美] R·J·GOLDSTICK 著

余热回收手册

中南工业大学出版社



266552

〔美〕 R.J. Goldstick 著

谢邦新 李支普 周昊 译

余热回收手册

中南工业大学出版社

1986年·长沙

内 容 提 要

余热回收是深度节能的主要途径和有效手段,由于余热源的种类繁多,其回收措施也是五花八门,本手册进行了系统归纳和精辟的分析,首先还提供了熟悉和掌握此技术所必需的理论基础,特别讲究各项节能措施的经济效益,最后列举出有代表性的实例并作出较详细的剖析。

本手册是广大热工技术人员、企业家和高等院校有关专业的师生所必需的工具书。

余热回收手册

R. J. Goldstick 著

谢邦新 李支普 周 昊译

责任编辑 王树勋

中南工业大学出版社出版发行

长沙矿冶研究院印刷厂印装

湖南省新华书店经销

开本: 787×1092 1/32 印张: 6.375 字数: 143千字

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷

印数: 0001—1500

ISBN 7-81020-043-7/TK·001

统一书号: 15442:020 定价: 1.50 元

译者说明

这本《余热回收手册》是根据美国1983年出版的新书《The Waste Heat Recovery Handbook》(Robert Albert著)翻译而成。全书共分八章,从余热回收理论基础及全面经济评估方法谈起,继而各个重要用热领域,在深度节能的基础上加以详细的阐述,最后列举了七种具有代表性的余热回收实例,并逐个地进行详细的剖析。内容丰富,深入浅出,资料新颖,图文并茂,在一定的程度上反映了当代余热回收技术的先进水平。原文版广销于欧、美、日及第三世界许多国家和地区,颇受欢迎。

国务院于最近正式发布了《节约能源管理暂行条例》,这标志着我国节能工作和相应的热工技术将向更广阔、更深入的领域发展。本手册的适时问世,不仅有益于读者开拓眼界,扩大知识面,而且为采用先进节能技术,更好地贯彻执行条例规定提供实际帮助。可以预计,各行各业(无论是民用的、军用的;生产的、生活的)从事节能的广大工程技术人员、能源规划、管理人员、热能工程专业的高年级学生、研究生和教师、以及有眼光的企业家,都将从本手册中获益。除了可作为他们的主要参考书外,本手册也可以作为新阶段节能培训班的较理想的教材。

此问题以手册的形式出现,在国内还是鲜见的。本手册由谢邦新(第三、第六章)、李支普(第五、七、八章)、周昊

（第一、二、四章）合译，全书由谢邦新校正。

顺便提一下，最近我们调研了全国几个有名的冶炼厂（有色与黑色）和设计研究单位，他们都希望有类似的余热回收手册能早日问世，以便查询。但由于繁忙等原因而略有耽搁，希见谅，并蒙指正。

1986年2月

鸣 谢

本手册承蒙许多科技部门的权威人士提供其领域内的可贵资料；此外在相应篇章中还得到几家有名望的公办刊物的忠诚合作，书中有几章是根据能源工程协会主办的第三、四届世界能源工程会议上宣读的论文而写成的。凡对本手册提供过其技术专长的仁君，在此一一表示感谢。

目 录

第一章	余热回收基础.....	(1)
第二章	余热回收的经济性.....	(36)
第三章	供暖通风与供冷的能回收 (HVAC)	(68)
第四章	燃烧设备的余热回收.....	(89)
第五章	低温热回收.....	(105)
第六章	高温热泵的应用.....	(118)
第七章	冷凝法热回收 ——直接接触式.....	(131)
第八章	余热回收实例及其剖析.....	(153)
附 录		(197)

第一章 余热回收基础

导 言

余热是指那种来自工业生产过程，尚可进一步利用于某种用途或经济目的，但被排放至周围环境的热量。

热能的首要特性不是它的数量，而是它的“品质”。

采用何种余热回收对策，部分地取决于热气的温度及其涉及的经济性。

本书将介绍在传统的余热回收系统中所包括的各种方法。此外，还将讨论象冷凝法热回收等新技术。虽然这些技术在美国还是比较新颖的，但在欧洲却早已应用多年。

第一、第二章中所使用的资料取自“余热管理指南”(Waste Heat Mangement Guidbooks)一书。该书由美国国家标准局商业分部出版，作者在此对Kenneth G. Kreider, Michael B. McNeil, W. M. Rohrer, Jr., R. Ruegg, B. Leidy和W. Owens诸位表示感谢，他们对本书的出版给予了极大的支持。

余热源

按温度的不同，余热源可划分为三个温域，温度在 1200°F (650°C)以上属高温域，在 $450\sim 1200^{\circ}\text{F}$ ($230^{\circ}\text{C}\sim 650^{\circ}\text{C}$)之间的属中温域，低于 450°F (230°C)的属低温域。

高、中温余热可用来产生工业生产用蒸汽。不过，如果哪里高温余热，在打算利用它时，首先应当考虑的是用这高温热能作有用功的可能性，而不是仅仅用它直接产生低压的工艺过程使用的蒸汽了事。燃气轮机和蒸汽轮机都是被广泛采用而又发展完善的热机。至于在低温域中的余热能，有时在其它方面已是无所作为的了，但还可以用一种所谓“热泵”的机械设备，消耗一定的机械功使之成为有用。

高温热回收

碳氢燃料的燃烧生成高温域的烟气，在大气中的燃烧设备

表 1-1

设 备 名 称	温 度 °F
镍精炼炉	2500~3000
铝精炼炉	1200~1400
锌精炼炉	1400~2000
铜精炼炉	1400~1500
钢精炼炉	1700~1900
铜反射炉	1650~2000
平 炉	1200~1300
水泥窑炉（干法工艺）	1150~1350
玻璃熔化炉	1800~2800
制氢厂	1200~1800
固体废物焚化炉	1200~1800
烟气焚化炉	1200~2600

内达到的理论最高温度可接近3500°F（约1930℃），而在实际运用的燃烧设备中测得的火焰的温度却低于3000°F（约1650℃）。有时为了使燃烧产物的温度降低至生产过程所需的温度，常向燃烧设备中引入二次空气或某种稀释气体。例如为了保护设备，只好降低余热的实际温度。

表1-1列出了高温域的工业生产设备排气的温度。这些数据都是直接由燃料的燃烧过程所得。

中温热回收

表1-2列出了来自生产设备并处于中温范围的废气的温度。在这个温度范围内，大多数的余热来自具有直接燃烧过程的生产装置。中温余热仍然有足够的温度，以致允许考虑采用蒸汽轮机或燃气轮机将这些热能转化为机械功的可能性。当进口压力在15~30磅/英吋²（1.05~2.12程大气压）表压范围

表1-2

设 备 名 称	温 度 °F
蒸汽锅炉烟气	400~900
燃气透平排气	700~1000
往复式发动机排气	600~1100
（有透平增压时）	450~700
热处理炉	800~1200
焙炉和干燥炉	450~1100
石油催化裂化炉	800~1200
燃烧炉冷却系统	800~1200

时，燃气轮机可得到经济的使用。而蒸汽几乎可以在任何需要的压力下产生。在经济上合算时，可使用蒸汽轮机。

低温热回收

表1-3列举了在低温域内的余热源，在这个温度范围内，要从余热源获得机械功，通常是不可能的。但如果需要的只是低压蒸汽的话，则用于产生蒸汽的可能性并未完全排除。作为辅助手段，用于达到预热工质（或工件）的目的，低温余热仍是有用的。举一个普通的例子来说，用来自运行在90°F的空调机冷凝器的热源去加热家用供水，在经济上可能是合算的。由于家用热水必须被加热到160°F，空调机的余热显然不够，然而，因为进入生活用水系统的冷水温度只有50°F左右，能够实现它们之间的热交换，从而使水温升高到略低于90°F。根据热水的需要量和空调机的负荷，任何多余的冷凝器的排热均可回收，而热水所需的其余部分能量可由常用电炉或火炉提供。

余热回收的应用

为了利用上述各种热源，人们总希望把一种流体的热传给另一流体（如把烟气中的热量传给补给水或供燃烧用的空气）。实现这种传递的装置称为热交换器。接下来要讨论的是下面列举的余热的常用情况，并在某种情况下，还举出对每种特殊场合下采用的热交换器的名称。

可把用来回收余热的设备汇编成列，由简单的如一根管子或通风道，到复杂的一台余热锅炉。

表1-3

热 源	温 度 °F
生产用蒸汽的凝结水	130~180
来自下列设备或部件的冷却水	
炉 门	90~130
轴 承	90~180
焊接机	90~180
喷射造型	90~180
退火炉	150~450
定型冲模	80~190
空气压缩机	80~120
水 泵	80~190
内燃机	150~250
空调机和制冷机的冷凝器	90~110
液体蒸馏冷凝器	90~190
干燥箱、烘箱、养护炉	200~450
加热的液体	90~450
热加工的固体	200~450

余热的某些利用如下所述：

中高温的排气可用来预热下列设备燃烧所需要的空气：

使用空气预热器的锅炉；

带换热室的熔炉；

带换热室的烘炉；

使用回热器的燃气轮机。

- 低、中温废气可通过省煤器对锅炉给水或补充水进行加热。省煤器是一种气体对水的加热装置。
- 废气和来自冷凝器的冷却水能够用来预热工业生产过程中的固态或液态给料，可采用管翅式和管壳式换热器。
- 废气可在余热锅炉里产生蒸汽，提供电力、机械动力、生产用蒸汽以及上述用途的任意组合。
- 余热可直接通过管道和烟道或间接地通过另一流体，如蒸汽或油类而转移给液体或气体的处理装置。
- 余热可通过换热器或余热锅炉传给中间流体，或者通过管道或烟道使热的出口气体加以利用。余热还可被用来运转一台空调与制冷用的吸收式制冷装置。

余热回收检测记录

为了对余热源进行估价，需要经常做检测记录。表1-4介绍的检测记录方式，用于余热检测，这时，记录废气的温度和流量是很重要的。烟气成份的数据对热回收和系统的设计计算也很重要。一定要注意污染物，因为这方面的因素将限制热回收设备类型的应用。污染物可以弄脏，甚至堵塞热交换器。

运行的操作规范影响到所指定设备的经济性及其型号的确定。例如，同是焚化炉，每日工作一班与每日工作三班所需回收排放物与余热的方法就不相同。一个用于余热回收的换热器在后一种操作情况下，将由于金属疲劳而很快损坏，而另一种类型的热回收焚化炉，它使用象石头或陶磁一类蓄热材料就较为合适。

表1-4 工业生产设备的检测记录表格

生产设备名称 _____ 资产编号 _____

设备安装位置：厂名 _____ 建筑物 _____

制造厂 _____ 型号 _____ 批号 _____

				温 度		气体成份体积%					
	名称	燃烧强度	高热值	燃烧空气	燃料	烟气	CO ₂	O ₂	CO	CH ₄	N ₂
主要燃料											
第一代用燃料											
第二代用燃料											

	通路 1	通路 2	通路 3	通路 4
流体组成				
流 量				
入口温度				
出口温度				
附 注				

年运行小时数 _____ 年容量系数% _____

年内燃料组成：主燃料 _____，第一代用燃料 _____，第二代用燃料 _____，

现行燃料价格：主燃料 _____，第一代用燃料 _____，第二代用燃料 _____，

年电能消耗：千瓦小时 _____

现行电能价格： _____

余热回收计算

热平衡

余热回收计算通常是从热平衡开始。热平衡是对过程的一种分析，它表示所有的热量从何处来，又往何处去。在评定各项热损失的潜在价值与提出余热利用方案方面，热平衡是一种不可缺少的手段。对蒸汽锅炉、工艺炉，空调设备等所作的热平衡必须由实际运行时期所作出的各项测量而取得的数据导出。要得到一个完整的热平衡所必须的测量包括：能量输入、对环境的能量损失、以及能量输出。

能量输入

输进大多数工艺设备的能量可以是以矿物燃料方式出现的化学能，液体流的显焓，蒸汽流的潜热，也可以是电能。

对每一输入都需要测量流体的流量或电流的大小。这就是说，假如要得到精确的结果，对每一股流体其流量都需要用分表测定（除非使用同一总表的所有其它设备可以关掉，以致该总表能够被用来测量指定装置的流量），但也不必连续分测每一流量，因为短时间的测量也能提供足够的信息。对采用压力比值燃烧控制的锅炉及其它炉子而言，可用流量控制器来产生确切的信号。还应该指出，对炉子和锅炉而言，只需要计量燃料的消耗。如果有确切的燃料消耗数据可利用，那么，排放物的测试将提供足够的信息来推算出氧化剂（通常为空气）的流量。

对电能消耗的测定，可用安培表测电流或者电度表可作为分表来安装。为了在不切断电路的情况下测量交流电流，采用带开口铁心变压器的安培计较好。这样做对临时性设施是特别方便的。

除了测量流进的每种流体的流量外，还需要知道该流体的化学成分。对于空气、水和其它的纯物质不需要测量其成分，但对于矿物燃料则应通过化学分析测定其成分，或者从燃料供应人那里获得，对于蒸汽则应该知道它的干度——即在蒸汽和水珠的混合物中存在的蒸汽的质量百分比。干度的测量用蒸汽干度计，它只需要少量的蒸汽样品。其它尚须测量的是流体入口处的温度和用电的电压（使用电功表时例外）。

上述测试常规，占用很多时间，免不了许多麻烦和花费；然而这些测试常规对精确分析是很需要的，并可成为工程分析和经济分析的关键要素。而这些分析对人们在决定余热回收设备的投资上赞同与否是很必要的。

根据热平衡，从热源回收的热由公式1-1决定

$$q = mC_p \Delta T_m \quad (1-1)$$

式中 q ——回收的热 Btu/时
 m ——流量 磅/时
 C_p ——流体的比热 Btu/磅度
 ΔT ——热回收时气体或液体温度的变化，°F

如果流体是空气，公式1-1可表达为

$$q = 1.08 CFM \Delta T \quad (1-2)$$

式中 CFM ——在英制单位中标准状态下每分钟的容积流量
 标呎³/分

如果流体是水，公式1-1可表达为

$$q = 500 \text{ GPM } \Delta T \quad (1-3)$$

式中 GPM——容积流量 加仑/分钟

模拟题1-1 某项余热检测记录指出,每小时10000磅190°F的水排向水沟,若利用这些水代替70°F的给水补给锅炉,可节省多少热能?燃料成本为6美元/每兆Btu。锅炉热效率为0.8,运行4000小时。

$$\begin{aligned} \text{分析: } q &= m C_p \Delta T = 10000 \times 1 \times (190 - 70) \\ &= 1.2 \times 10^6 \text{ Btu/时} \end{aligned}$$

$$\text{节省费用 } 1.2 \times 10^6 \times 4000 \times 6/10^6 / 0.8 = 36000 \text{ 美元}$$

对流传热

对流是指在流体(气体或液体)内部流体元之间的热传递,式1-4是对流换热的基本表达式。 U_o 在这里表示对流传热系数,单位是Btu/呎²·时·度。

换热器使用的传热公式广泛采用导热和对流的综合式,表达为

$$q = U_o A \Delta T_m \quad (1-4)$$

式中 q ——对流换热的热流 Btu/时
 U_o ——总的传热系数 Btu/呎²度时
 A ——管子的表面积 呎²

ΔT_m ——对数平均温差,它反映两种流体在流过换热面时温度变化的情况。

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln[\Delta T_1 / \Delta T_2]} \quad (1-5)$$

为了更好地了解不同的对数平均温差的关系式,请参看图