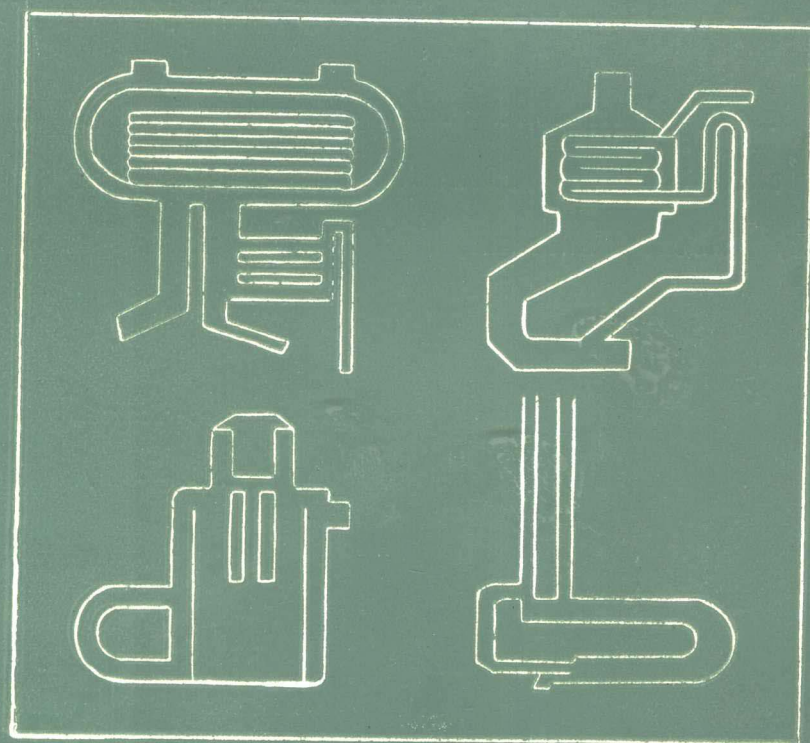


# 余热回收手册

(美) ROBERT J. GOLDSTICK  
ALBERT THUMANN



北京能源学会

1986

## 目 录

|     |                  |      |
|-----|------------------|------|
| 第1节 | 余热回收基础.....      | (1)  |
| 第2节 | 余热回收经济分析.....    | (15) |
| 第3节 | 暖通空调余热回收.....    | (29) |
| 第4节 | 燃烧设备余热回收.....    | (37) |
| 第5节 | 低温余热回收.....      | (43) |
| 第6节 | 高温热泵应用.....      | (48) |
| 第7节 | 冷凝热回收 直接接触法..... | (52) |
| 第8节 | 余热回收实例研究.....    | (60) |

本书根据美国Fairmont Press, Inc.公司1983年出版的《The Waste Heat Recovery Handbook》译出。原作者: Robert J. Goldstick, Albert Thumann。

北京能源学会手册编译组

1986年8月

# 第1节 余热回收基础

## 引言

余热是指一个过程中产生出来的虽能为某种有用的和经济的目的再行使用、但仍排放到环境中去的热能。

余热的重要特征不是数量而是它的“价值”。

采用什么办法回收这些余热，部分地取决于余热气体的温度以及有关的经济效益。

本书介绍各种传统的回收余热的方法。此外还讨论一些诸如冷凝热回收等新技术。这些技术在美国市场上虽然还比较新，但在欧洲已采用十年之久。

本书第1和第2节中所用部分材料取自美国商业部和国家标准局联合出版的《余热管理指南》<sup>(1)</sup>。

## 余热源

余热源可按温度分为三个温度等级。高温指1200°F以上。中温为450°F至1200°F，低温则为450°F以下。

高温和中温余热可用来生产过程蒸汽。如果有高温余热而不准备用于直接生产蒸汽，则可考虑在抽取余热之前先用高温余热做有用的功。燃气轮机和汽轮机均可使用，两者都是很成熟的热机。

低温范围的余热有时可通过叫作热泵的设备施加机械功而加以利用。

## 高温余热回收

烃类燃料的燃烧产生出高温的气体。常压燃烧器中可能达到的最高理论温度约为3500°F以下，而在实际燃烧器中测得的火焰温度则在3000°F以下。燃烧器中常加进二次空气或其它稀释剂，将产品温度降至所需的过程温度，例如为了保护设备，这样也就降低了实际的余热温度。

表1-1列举了高温范围的工业过程设备排气温度。所有排气均产生自直接燃烧燃料的过程。

表1-1

| 设备种类    | 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 |
| 钢加热炉    | 1700 - 1900 |
| 铜反射炉    | 1650 - 2000 |
| 平炉      | 1200 - 1300 |
| 水泥窑(干法) | 1150 - 1350 |
| 玻璃熔炉    | 1800 - 2800 |
| 制氢设备    | 1200 - 1800 |
| 垃圾焚烧炉   | 1200 - 1800 |
| 烟雾焚烧炉   | 1200 - 2600 |

## 中温余热回收

表1-2所列为中温范围的过程设备排气温度。该温度范围的大多数余热都是来自直接燃烧的过程设备的排气。中温余热的温度还相当高，可以考虑用汽轮机或燃气轮机从余热中抽取有用的功。在某些情况下，当进口压力在15—30磅/平方英寸表压范围内时，可以经济地利用燃气轮机。几乎可以生产出任何所需压力的蒸汽，并经济地利用汽轮机。

表1-2

| 设备种类               | 温度(°F)   |
|--------------------|----------|
| 锅炉排气               | 450—900  |
| 燃气轮机排气             | 700—1000 |
| 往复式发动机排气           | 600—1100 |
| 往复式发动机排气<br>(涡轮增压) | 450—700  |
| 热处理炉               | 800—1200 |
| 烘干炉和烘烤炉            | 450—1100 |
| 催化裂化塔              | 800—1200 |
| 退火炉冷却系统            | 800—1200 |

## 低温余热回收

表1-3列举了某些低温范围的余热源。在此温度范围内，从余热源抽取功一般是不实用的，但如果有低压蒸汽的需要，则并不完全排除蒸汽生产的可能。低温余热可以附带地用于预热。举一个普通的例子：可以经济地利用围绕90°F运行的空气调节冷凝器的余热来加热家用热水。由于热水必须加热至约160°F，空调器的余热显然是不够的。但是，由于冷水进入家用水系统时为50°F，可进行能量交换，而将水温升至90°F以下某个温度。由于相对空气调节超前量和热水的要求，任何多余的冷凝器热能都被排放

掉，而热水则需要电加热器或燃烧加热器来提供补充的热能。

表1-3

| 余热源       | 温度(°F)  |
|-----------|---------|
| 过程蒸汽冷凝液   | 130—190 |
| 冷却水，来自：   |         |
| 炉门        | 90—130  |
| 轴承        | 90—190  |
| 电焊机       | 90—190  |
| 注塑机       | 90—190  |
| 退火炉       | 150—450 |
| 成型模       | 80—190  |
| 空压机       | 80—120  |
| 泵         | 80—190  |
| 内燃机       | 150—250 |
| 空调和制冷冷凝器  | 90—110  |
| 液体蒸馏釜冷凝器  | 90—190  |
| 烘箱、烤箱和硫化炉 | 200—450 |
| 热处理液体     | 90—450  |
| 热处理固体     | 200—450 |

## 余热回收应用

为了利用上述余热源的余热，人们常常希望将一种流体中的热传至另一种流体（例如，从烟气传至给水或助燃空气）。完成这种传热功能的设备叫热交换器。下面将列举余热的一般用途，并在某些情况下指出通常可采用的热交换器的名称。

用于回收余热的设备，可以简单到一根管道或风道，也可复杂到一台余热锅炉。

余热的某些用途如下：

• 中至高温排气可用于下列设备的助燃空气预热：

- 采用空气预热器的锅炉
- 采用同流换热器的加热炉
- 采用同流换热器的燃烧炉
- 采用同流换热器的燃气轮机

• 低至中温排气可用来预热锅炉给水或锅炉补给水。预热通过省煤器进行。省煤器就是一个气体至液体的水加热设备。

• 冷凝器的冷却水和排气可用来预热工业过程中的液体和（或）固体原料。预热时采用肋管和壳管式热交换器。

• 排气可用来在余热锅炉中产生蒸汽，以产生电力、机械动力、过程蒸汽以及上述三者的任意组合。

• 余热可以通过管道直接或通过蒸汽或油等二次液体间接传给液体或气体过程设

备。

• 余热可通过热交换器或余热锅炉而传给一种中间流体，或者使热出口气通过管道循环而加以利用。余热可用来操作空调或制冷的吸收式冷却设备。

## 余热回收调查

为了了解余热源，一般要进行调查。图1-1所示是可以用于余热核算的一种调查表。记录废气的流量和温度是很重要的。

工业过程设备调查表

设备名称 \_\_\_\_\_ 财产号 \_\_\_\_\_  
 设备地点，厂名 \_\_\_\_\_ 厂房号 \_\_\_\_\_  
 制造厂 \_\_\_\_\_ 型号 \_\_\_\_\_ 序号 \_\_\_\_\_

|      |     |     |     | 温 度  |     |     | 烟气成份，% 体积       |                |    |    |                |
|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----------------|----------------|----|----|----------------|
| 一次燃料 | 名 称 | 耗 量 | 高热值 | 助燃空气 | 燃 料 | 烟 气 | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO | CH | N <sub>2</sub> |
|      |     |     |     |      |     |     |                 |                |    |    |                |
| 第一代用 |     |     |     |      |     |     |                 |                |    |    |                |
| 第二代用 |     |     |     |      |     |     |                 |                |    |    |                |

|      | 流路 1 | 流路 2 | 流路 3 | 流路 4 |
|------|------|------|------|------|
| 流体成分 |      |      |      |      |
| 流量   |      |      |      |      |
| 进口温度 |      |      |      |      |
| 出口温度 |      |      |      |      |
| 说明   |      |      |      |      |

年运行小时 \_\_\_\_\_ 年容量系数，% \_\_\_\_\_

年燃耗：一次燃料 \_\_\_\_\_，一代用 \_\_\_\_\_ 二代用 \_\_\_\_\_

现燃耗费：一次燃料 \_\_\_\_\_，一代用 \_\_\_\_\_ 二代用 \_\_\_\_\_

年电耗，千瓦小时 \_\_\_\_\_

现电费率 \_\_\_\_\_

污染物质 \_\_\_\_\_

图 1-1 余热调查表

成分数据为余热回收和系统设计计算所需。一定要注明污染物质,因为这个因素可能会限制所用余热回收设备的类型。污染物质可能使热交换器结垢或堵塞。

运行时间安排要影响到所选设备的经济效益和类型。例如,一天只用一班的焚烧炉,它所要求的排放热回收方法可能与一天开三班的炉子不同。在后一种工作条件下使用的余热回收热交换器可能由于金属疲劳而很快损坏。另一种利用岩石或陶瓷等贮热材料的热回收焚烧炉可能更为适用。

## 余热回收计算

### 热平衡

余热回收计算一般都是从热平衡开始。热平衡就是对一个过程进行分析,指明所有热能来自何处,去向何处。这是分析热能损失的复杂情况和评价建议的余热利用项目的重要工具。锅炉、过程加热炉、空调器等等的热平衡必须以实际运行期间的测量值为出发点。为得到完整的热平衡所需的测量包括:热能投入、热能在环境中的损失以及热能释出。

### 热能投入

热能是作为化学能或电能而进入大多数过程设备的。化学能则是采取矿物燃料、流体中的显焓、蒸汽流中的潜热等形式。

对每种投入都必须进行流体流量或电流的计算。这就是说,为要得到准确的结果,就必须对每个能流分别进行计量(除非由一个总表计量的所有其它设备可以被关掉,从而用总表测量设备的进口能流)。没有必要连续分别计量每一个能流,因为临时安装仪表已可提供足够的信息。对于采用压力比燃烧控制的炉窑和锅炉,可以使用控制流量仪表以得到正确的数据。还应指出,对于炉窑和锅炉,只需计量其能耗。如果有了准确的能耗数据,则为求出氧化剂(通常是空气)

的流量,只要测出排放物就够了。

对于电能投入量,可用安培表测量电流,也可安装一电度表作为分表。有一种采用分裂铁心式互感器的安培表,可以不必断开线路测量电流。这对临时测量是特别方便的。

除了测量每种进口物流的流量外,还必须知道物流的化学成分。对于空气、水和其它纯物质,无需测成分,但对矿物燃料,则必须通过化学分析测定其成分,或者由燃料供应商提供保证。对于蒸汽,必须知道其质量,也就是蒸汽与液滴混合物中蒸汽质量所占比例。质量测量用蒸汽量热计进行,这种仪表只需少量的蒸汽流采样。

所需的其它测量是进口流体物流的进入温度以及电能的电压(如已用电度表即可免去)。

上述测量程序要花费很多时间和人力物力。但对于准确的分析是必需的,而且可能成为余热回收设备投资决策所要求的工程和经济分析中的关键因素。

根据热平衡,从余热源回收的热能由式1-1决定。

$$q = mc_p \Delta T \quad 1-1$$

式中:  $q$ —回收的热能, Btu/hr (英热单位/小时)

$m$ —质量流量, lbs/hr (磅/小时)

$c_p$ —流体比热, Btu/lb · °F

$\Delta T$ —热回收中气体或液体的温度变化, °F

如果流体为空气,则式1-1表示为

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

式中: CFM—体积流量, 标准CFM (立方英尺/分)

如果流体是水,则式1-1表示为

$$q = 500 GPM \Delta T \quad 1-3$$

式中: GPM—体积流量, 加仑/分

### 模拟例1-1:

一项余热核算调查发现,有190°F的水

10000lb/hr排入下水道。如果用这水作锅炉补给水，以取代70°F的给水，能节约多少热能？燃料价为\$6/10<sup>6</sup>Btu，锅炉效率0.8，运行小时数8000。

### 分析

$$q = mc_p \Delta T = 10000 \times (190 - 70) \\ = 1.2 \times 10^6 \text{ Btu/hr}$$

$$\text{节约} = 1.2 \times 10^6 \times 4000 \times \$6/10^6/0.8 \\ = \$36000$$

### 对流传热

对流是热能在一流体（气体或液体）中的传送。式1-4表明了对流传热的基本形式。其中 $U_o$ 为对流膜导热率，Btu/ft<sup>2</sup>·hr·°F。

换热器的传热主要是传导和对流的结合，表示为：

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

式中： $q$ ——对流传热率，Btu/hr

$U_o$ ——总传热系数，Btu/ft<sup>2</sup>·hr

·°F

$A$ ——管子的表面积，ft<sup>2</sup>

$\Delta T_m$ ——对数平均温差，代表了两种流体流过换热表面时温度发生变化的情况。

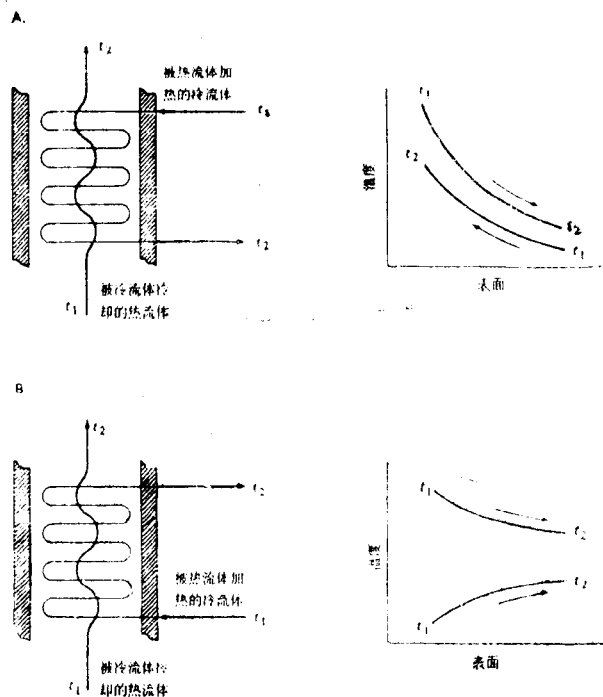
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad 1-5$$

为了理解对数平均温差的关系，可利用图1-2。参照图1-2，逆流换热器的 $\Delta T_m$ 为：

$$\Delta T_m = \frac{(t_1 - t'_2) - (t_2 - t'_1)}{\ln[(t_1 - t'_2)/(t_2 - t'_1)]} \quad 1-6$$

顺流换热器的 $\Delta T_m$ 为：

$$\Delta T_m = \frac{(t_1 - t'_1)/(t_2 - t'_2)}{\ln[(t_1 - t'_1)/(t_2 - t'_2)]} \quad 1-7$$



A. 逆流

B. 顺流

图1-2 换热器的温度关系

## 余热回收设备

工业热交换器有许多别名，如同流换热器、回热器、热轮、温度和水分交换器等。不管用什么名字，它们都完成一个基本功能：换热。

热交换器有单程或多程气对气、液对气、液对液、蒸发器、冷凝器、顺流、逆流和横向流之分。单程或多程是指加热或冷却介质穿过传热表面一次还是多次。多程流动要采用内隔板。以下三个术语是指热交换器中传热的两种流体，而且隐含着表示流体中不存在相变。此处“流体”是就其最普遍的意义使用的。所以，我们可以说，这几个术语适用于非蒸发和非冷凝的热交换器。蒸发器是指热传至一蒸发（沸腾）液体的热交换器，而冷凝器则指热从冷凝蒸汽排出的热交换器。顺流换热器是两种流体大体上朝一个方向流动的热交换器，而在逆流热交换器中，两种流体朝相反方向运动。当两种流体相互垂直地流动时，热交换器就是横向流热交换器。

工厂中回收余热的主要方法就是利用热交换器。热交换器是一个系统，它将含有余热的物流与吸收余热的介质分开，但允许热流流过分离的边界。将两个物流分开的原因可以是下面的任何一个：

(1) 两物流之间可能存在压力差。热交换器的刚性边界可作适当设计以耐受此压差。

(2) 在即使不是大多数的也是许多的情况下，如果允许两个物流混合，则一物流会污染另一个。热交换器防止二者混合。

(3) 热交换器可以使用一个中间流体，它较两个主要换热介质更适于长距离传送余热。二次流体常常是蒸汽，但也可选用一些有特殊性能的物质。

(4) 某些类型的热交换器，特别是热

轮，能传送液体和热能。气体中待冷却的蒸汽先在热轮中冷却，然后再蒸发入待加热气体。这可以改善湿度和（或）过程控制，防止大气污染，并节约宝贵的资源。

热交换器所以有各种不同的名称，部分是由于企图描述它的功能，部分是由于某些工业部门的传统。例如，同流换热器是从炉窑排气中回收余热用于加热新的助燃空气的热交换器。这个名称在钢铁和玻璃工业中使用。在电厂蒸汽发生器中完成同一功能的热交换器，叫作空气预热器，而在燃气轮机设备中，则叫作回热器。

但是，在玻璃和钢铁工业中，回热器一词是指两个砖砌小室，两室交替地吸收排气中的热能，然后释放部分热能给进入的新空气。烟气流和空气流周期地被阀门所反转，使回热器的一个室被燃烧产物加热，同时另一个室则被进入的空气所冷却。回热器的购买和维护费用常较同流换热器贵，主要用于玻璃熔槽和平炉中。

但是必须指出，上述三种热交换器的功能虽相似，但它们的结构以及主要的传热方式都可能大不相同。本节后面还要更详细地介绍各种工业热交换器，并澄清其差异的细节。

一台工业热交换器的规格应当包括热交换容量、流体温度、每个流体通道中的允许压降以及进入交换器的流体的特性和体积流量。这些指标将决定热交换器的结构参数，从而也决定其成本。最终设计将是压降、热交换器效率和成本这三者之间的折衷。导致该最终设计的决策将使整个系统的维护和运行费用与固定投资相平衡，使其总和为最小。供应厂商可对热交换器的选择和设计提出建议。

为了对余热回收设备作出最佳选择，必须了解的重要参数是：

- 余热流体的温度
- 余热流体的流量

- 余热流体的化学成分
- 余热流体的最低容许温度
- 被加热流体的温度
- 被加热流体的化学成分
- 被加热流体的最高容许温度
- 控制温度，如需要控制的话

在本节下文中，将对几种通用的余热回收设备作较详细的讨论。

## 气—气热交换器

### 同流换热器

最简单的热交换器是金属辐射同流换热器，它由两根长的同心金属管子构成，如图1-3所示。

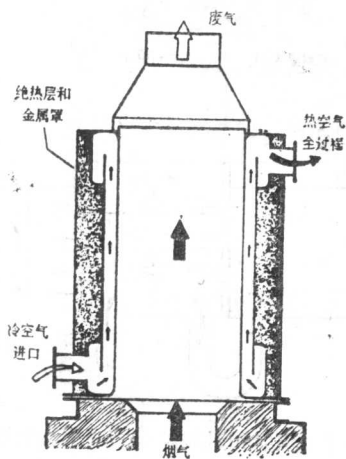


图1-3 金属辐射同流换热器

内管承载热排气，而外环形孔道则将大气中的助燃空气送至炉子燃烧器的空气进口。热气被进入的助燃空气所冷却，而助燃空气现在则携带附加的热能进入燃烧室。这部分热能不是由燃料供给的；因此，对于一定的炉子负荷而言，用的燃料就减少了。节约燃料意味着减少助燃空气，这样也就降低了烟道损耗，这不仅仅是由于烟气温度的降低，而且也由于排气量的减少。在同流换热器中，由热气向内管表面传热主要是靠辐射传热。但环形孔道中的冷空气对于红外辐射

来说几乎是透明的，所以对于进入的空气只有对流传热。如图所示，两种气流通常是顺流的，尽管逆流的结构更简单，传热效率更高。采用顺流的原因在于，同流换热器常常还起着载送排气的管道的附加冷却功能，以延长管道的寿命。

内管常用高温材料制造，如高镍含量的不锈钢。进口处大的温差造成不平的膨胀，因为外壳一般采用其它的较便宜的材料制造。机械设计中应考虑这个效应。更为精细的辐射同流换热器设计分成两段：下段为顺流，上段就采用效率更高的逆流方式。由于同流换热器底部有很大的轴向膨胀和应力，故设备在顶部由一活动支架支持，此支架在炉子和同流换热器之间有一膨胀接头。

第二种同流换热器叫作管式或对流同流换热器。如图1-4所示，热气体通过若干根平行的小直径管子，而待加热的进入空气则进入一包围管子的外壳，以垂直于管轴的方向流过热管子一次或几次。

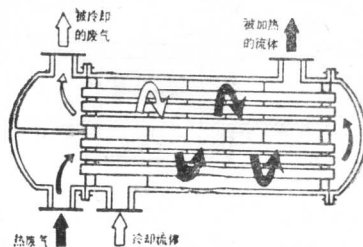


图1-4 对流式同流换热器原理图

如果管子加了折板，使气体流过管子两次，则这种热交换器叫作双程同流换热器，如果采用了两个折板，就叫三程同流换热器，等等。折板虽增加了交换器的成本和助燃空气通道的压降，但它提高了热交换效率。壳式和管式同流换热器一般较辐射同流换热器结构紧凑，效率更高，因为采用了多根管子并使气体多次通过，所以传热表面更大。

金属同流换热器回收余热的主要限制，是当进口温度超过2000°F时，其内衬的寿

命降低。在此温度下，必须采取效率较低的排气顺流方式并采用冷却剂，以保持内壳的足够冷却。此外，当助燃空气由于负荷减少而下降时，热废气预热助燃空气的传热率就变得过高，而使表面迅速损坏。所以，必须有一个大气空气的旁通通道，以便冷却排气。

为了克服金属同流换热器的温度限制，研制出了陶瓷管同流换热器，实验中废气侧温度可达 $2800^{\circ}\text{F}$ ，预热空气侧 $2200^{\circ}\text{F}$ ，较为实用的则为 $1500^{\circ}\text{F}$ 。早期的陶瓷同流换热器用瓦制成，瓦则用炉用水泥连接在一起，热循环造成接头断裂和管子的迅速损坏。以后研制出了各种短的碳化硅管，可以用位于空气联箱中的挠性密封连接。这种如图1-5所示的专利设计，将密封保持在较低温度下，密封漏泄率降至百分之几。

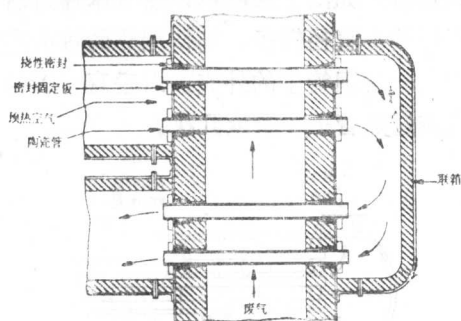


图1-5 陶瓷同流换热器

早期的设计有8-60%的漏泄率。近两年报道的新设计，空气预热温度高达 $1300^{\circ}\text{F}$ ，漏泄率则低得多。

图1-6所示为对流式同流换热器的另一种结构方式，冷助燃空气在一伸入到烟气流中的平行垂直管组中被加热。据称这种结构的优点是更换个别管子很容易，在炉子全容量运行过程中即可进行。这样就最大限度地降低了成本，减少了不方便性以及同流换热器发生故障时炉子被迫停机可能造成的危险。

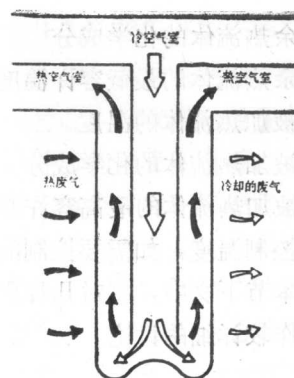


图1-6 垂直管内管同流换热器

为了达到最高的传热效率，可将辐射型和对流型同流换热器结合使用，对流型总是接在高温辐射型同流换热器之后。这种结构如图1-7所示。

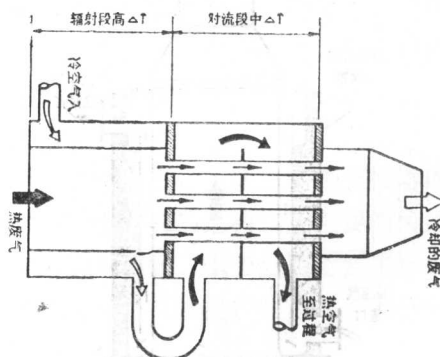


图1-7 辐射和对流结合式同流换热器

采用同流换热器节约工业炉的燃料，虽然其初始成本不算高，但购买设备常常只是更大的投资计划的开始。使用同流换热器，使入口助燃空气温度升高，这可能要求购买高温燃烧器、带软接头允许膨胀的更大直径空气管线、冷却燃烧器的冷空气管线、在同流换热器加热变化条件下保持空燃比所需的改进的燃烧控制、烟道挡板、冷空气放气、鼓风机或动力发生故障时保护同流换热器的控制设备以及克服同流换热器中附加压降的更大的风机。特别重要的是，要保护同流换热器防止过高温度造成损害，因为重

修一台损坏的同流换热器的费用可高达初始制造费用的90%，而损坏的同流换热器很容易将燃料费增加10-15%。

图1-8 所示是配有辐射同流换热器的辐射管燃烧器。对于这样一个短的烟道，必须用两个进空气的环形孔道以达到合理的换热效率。

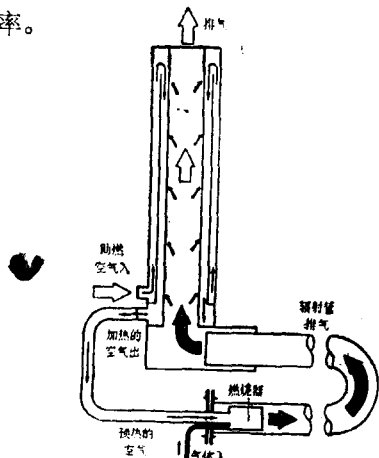


图1-8 与辐射管燃烧器配用的小辐射型同流换热器

同流换热器用于回收中温和高温排气的余热，以加热其它气体。其典型应用有均热炉、退火炉、熔炼炉、复燃室和气体焚烧器、辐射管燃烧器、再热炉以及其它中温和高温气对气余热回收应用。

### 热轮

有一种旋转回热器（也叫作空气预热器或热轮）在中温和低温余热回收中获得愈来愈广泛的推广。图1-9所示为热轮应用的示意。它是一个很大的用某种有较高热容量的材料制成的疏孔圆盘，在并列的两个风道之间旋转；一个是冷气体风道，另一个是热气体风道。圆盘的轴与两风道平行，并处于两个分隔之间。圆盘缓慢旋转，显热（在某些情况下，含潜热的水分）由热空气传给圆盘，再旋转，则由圆盘传给冷空气。这种回热器的显热传热总效率可高达85%。大的热轮，直径达70英尺，空气容量40000平方英尺/分钟。多台设备可以并联运行。这样就可避

免容量要求与整装设备尺寸规格有限的矛盾。在极大型的装置中，如固定式电站助燃空气预热用的装置，设备要专门设计。

热轮温度范围的限制主要是旋转轮不均匀膨胀造成的机械上的困难，温度差意味着很大的不同膨胀，造成热轮过多变形，因而难以在风道与热轮之间保持适当的气密性。

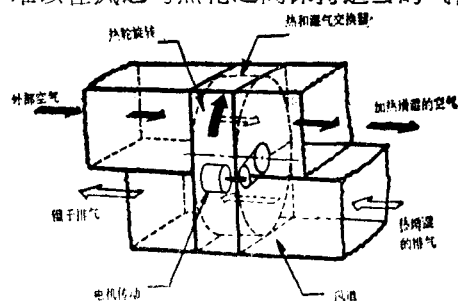


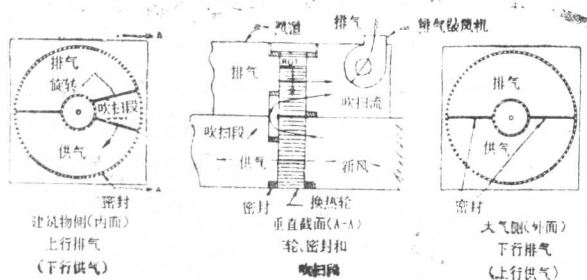
图1-9 用热轮式回热器回收热能和水分

热轮有四种类型。第一种是一个金属框架，配有不锈钢或铝丝编结的筛心；第二种叫层式热轮，用波纹状金属制成，由许多平行流道组成；第三种也是层式的，但采取陶瓷蜂窝状结构。这种热轮用于高温，目前的上限约1600°F。第四种也是层式结构，但其流道表面涂复吸湿材料，故可回收潜热。吸湿热轮所用封装材料有多种，常常叫作干燥剂。

大多数工业烟道气都含有水蒸汽，这是因为水蒸汽是所用燃料燃烧的产物，因为许多工业过程都使用水，而当过程水暴露于热气体时就部分蒸发。每磅水在大气压下蒸发需要约1000Btu，因此，在出口物流中每磅水蒸汽就带走1000Btu的热能。此潜热可能占出口气流中显热的很大一部分。吸湿材料如氯化锂等吸收水蒸汽很迅速。氯化锂是一种固体，吸收水而形成水合物  $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，其中一个氯化锂分子与一个水分子结合。所以在  $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$  中水与氯化锂的重量比为3:7。在吸湿热轮中，热气流将部分水蒸汽给与涂层；进入热轮待加热的冷气体较进口风道中的气体干燥，因而吸收的水一

部分给了进口气体流。水的潜热直接加到回收余热的总量上。水蒸汽的回收效率可高达50%。

由于热轮的气孔将少量的排气载入进气风道,可能造成交叉污染。如果此污染是有害的,则可增设一个清吹段来部分地排除此排气,在此清吹段中将少量清洁空气吹过热轮,清洗排气通道。图1-10所示为采用了清吹段的装置。注意,需要用附加密封来隔离清吹风道。一般的作法是换6次清洁空气进行清吹。这就将层状热轮中气体污染限制到小于0.04%,粒子污染限制在小于0.2%,在整装热轮中将交叉污染限制到小于1%。如果不管加热负荷和排气温度如何,都要保持进口气体温度恒定,则热轮必须进行变速驱动。这就需要有一个变速传动机构和采用进口空气温度传感器和控制元件的转速控制系统。但这样做,使系统成本和复杂性大为增加。在高湿度和亚零温度季节使用户外空气运行时,热轮需采用预热系统以防结霜。如果操作对象气体含有水溶物、油脂性和粘性杂质或过程灰尘浓度很大时,则在热轮上游排气系统中需采用空气过滤器。



1-10 配有清吹段以清除传热表面杂质的热轮

热轮的一种应用是由于健康和安全的原因而需要大量通风空气的采暖场合。为了排除有毒气体或防止爆炸性混合物积累,换气量可达到每小时20或30次。在这样大的通风量下保持舒适的采暖温度是非常昂贵的,而使热轮的采用变得经济可行。在夏季,热轮

可来自冷排气冷却进入的空气,将空调负荷降低50%。应当指出,在许多必须采取大通风量的场合,比安装热轮更好的办法是采用局部通风系统降低危险及(或)在主要工作区域采用红外采暖。

热轮在低温和中温过程热回收方面获得愈来愈多的应用。典型的应用有固化炉、干燥炉以及所有规格的工业和电厂锅炉的空气预热器等。

### 空气预热器

消极气对气回热器有时亦称空气预热器,可供用于不允许任何交叉污染的场合。这种回热器由交错的通道构成如图1-11所示,使加热气体和被加热气体互相密切接触,中间只隔一层导热金属薄壁。这种回热器比热轮体积大,也更贵,因为要得到相同的效率,需要大得多的传热表面。除了没有交叉污染外,另一个优点是机械复杂性降低,因为不需要传动机构了。但是,对于被动回热,更难达到温度控制,如果这是一个要求的话,它的结构简单的优点就要部分地损失了。

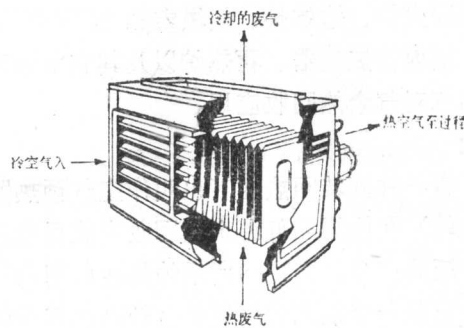


图1-11 被动气对气回热器

气-气回热器用于在中和低温范围内回收排气的余热以加热其它气体。典型的应用如下所列:

- 自建筑物采暖和通风系统回收热能和湿气
- 自保温室和游泳池回收热能和湿气
- 降低建筑物空调器负荷

- 自湿的工业过程回收热和水
- 自锅炉排气回收热能
- 自气体和蒸气焚烧器回收热能
- 自烘箱、烤箱和固化炉回收热能
- 自燃气轮机排气回收热能
- 在低到高温范围内自其它气对气换热中回收热能

### 热管换热器

热管是一种仅在近来才成为商品的传热元件，但由于它的效率高，体积小，而很有希望成为工业余热回收的一种备选方法。在使用中，它是作为一个被动气对气翅片管回热器而起作用的。如图1-12所示，热管元件是一束伸入排气风道和进口风道的热管，其样式象翅片盘管热交换器。但每条管子都是一个单独的密封元件，由占管子内部全长的环形管芯构成，管芯内输送适当的传热流体。

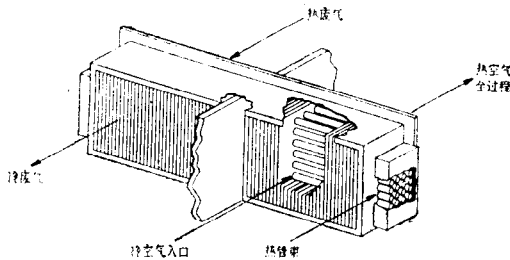


图1-12 装入气对气回热器的热管束

图1-13表明，自热排气吸收的热能将输送的流体蒸发，使蒸汽集中到管子中心。蒸发潜热在蒸汽中被带到位于冷气体风道中的热管冷端。蒸汽在这里冷凝，释出潜热。冷凝的液体再通过毛细管（和/或重力）作用返回热端，重新循环。热管的体积小，效率高，这是因为：（1）翅片管束本身就是两个气体风道中进行对流传热的良好结构；（2）热管内部的蒸发和冷凝循环是在内部传热的高效方法。它也没有交叉污染。

热管的可能应用包括：

- 烘箱、烤箱和固化炉

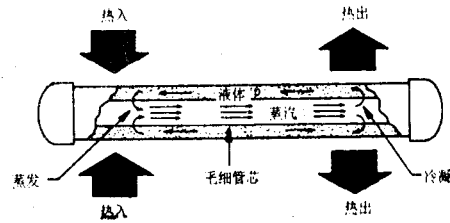


图1-13 热管原理

- 废蒸汽回收
- 锅炉中的空气预热器
- 空气干燥器
- 砖窑（二次回收）
- 反射炉（二次回收）
- 采暖、通风和空调系统

### 气体或液体对液体回热器

#### 翅片管热交换器

如果回收排气中的余热加热液体，用于家用热水、加热锅炉给水或热水供暖，则一般是采用翅片管热交换器。圆形管连接成管束以容纳被加热的液体，翅片焊接或用其它方法连接在管子外部，以增加从排气中取出余热的换热面积。

图1-14所示为位于风道中的翅片管热交换器的通常结构以及典型翅片管的构造细节。这种应用较通用的名称是省煤器（省油器）。管子常常全部串接，但也可安排成串并联管束，以控制液体侧的压降。空气侧压降则通过管子的间隔以及风道中的管排数来控制。

翅片管热交换器有预组装成大构件的，也可按用户订货要求用标准件迅速组成。被加热的液体的温度控制通常由一旁通风道实现，此风道改变流过热交换器的热气流量。管子和翅片的材料要选择能耐受腐蚀性液体和（或）腐蚀性排气的。

翅片管热交换器用于自排气中回收低

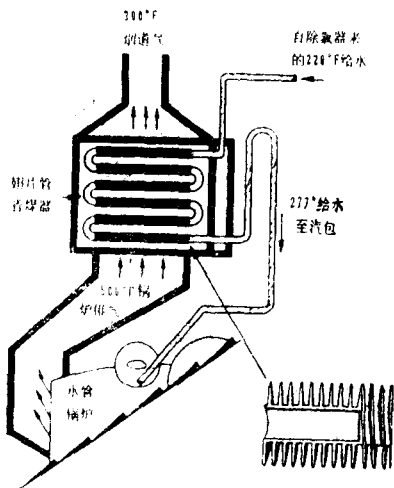


图1-14 翅片管气对液回热器 (省煤器)

温和中温余热，加热液体。典型的应用有：家庭热水供暖、锅炉给水加热、热水供暖、吸收型制冷或空调以及过程液体加热。

#### 壳管式热交换器

如果含余热的介质是液体或蒸汽，用于加热另一种液体，则必须采用壳管式热交换器，因为两个通道都必须密封以容受各自流体的压力。外壳中包含管束，通常还有内折板以使壳中流体多次流过管子。外壳一般不如管子坚固，所以较高压力的流体在管中循环，而较低压力的在外壳中循环。如果是蒸汽含有余热，它通常要冷凝，而将其潜热传给待加热液体。在这种场合下，蒸汽差不多总是包含在外壳中。如果不这样做，蒸汽在小直径平行管中的冷凝将造成流量不稳定。有各种标准尺寸的管壳热交换器，管和壳的材料可有许多不同的组合。

壳管式热交换器的典型应用包括：用制冷和空调系统中冷凝液，过程蒸汽的冷凝液，炉门、炉篦和管支架的冷却剂，发动机、空压机、轴承和润滑剂的冷却剂以及蒸馏过程的冷凝液等所含热能加热液体。

#### 余热锅炉

余热锅炉就是水管锅炉、燃气轮机、焚化炉等等的热排气在锅炉中通过若干含水的

平行管。水在管内蒸发，被收集到汽包中，供用作加热或过程蒸汽。

图1-15所示的结构，排气通过水管两次之后排入空气中。因为排气一般属中温范围，而且为了节省空间，可将水管加翅片以增加气体侧有效传热表面，则锅炉可更为紧凑。图中示出了泥包、热气体两次流过的管组及收集水面上产生的蒸汽的汽包。产生蒸汽的压力以及蒸汽产量取决于进入锅炉的热气体的温度、热气体流量和锅炉的效率。在有液体存在的条件下，此液体的纯蒸汽的压力是该液体温度的函数。蒸汽表列举出饱和压力和温度的这种关系。如果排气中的余热不足以生产出所需数量的过程蒸汽，可以增设一个辅助燃烧器，在余热锅炉中烧燃料，或者在余热锅炉前排气风道处加一个加力燃烧室。余热锅炉的容量从每分钟排气量少于1000立方英尺到近100万立方英尺。

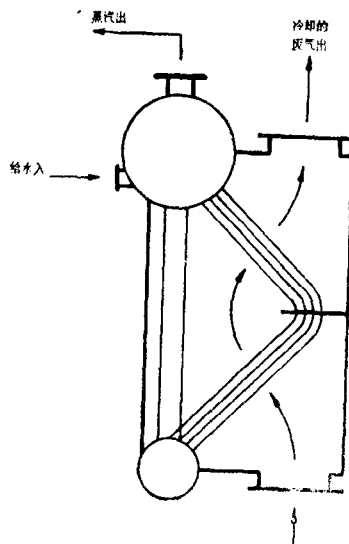


图1-15 自燃气轮机或焚烧炉回收余热的余热锅炉

余热锅炉的典型应用是自燃气轮机、往复式发动机、焚烧炉以及加热炉排气中回收余热。

#### 气体和蒸汽膨胀机

工业汽轮机和燃气轮机已发展成熟，有

现成商品出售。现在已有用低压废气的特殊燃气轮机产品；例如用高炉顶气的燃气轮机。这种燃气轮机可产生20兆瓦的电力，即回收高炉排气流所含能量的20-30%。最高炉顶压力约为40lb/in<sup>2</sup>g(磅/平方英寸表压)。

较上例应用更广的大概是汽轮机，用来产生机械功或驱动发电机。汽轮机在取出必要的热能做功之后，以低于进口的压力排出已部分消耗的蒸汽。汽轮机排气中热能可按通常方式用于过程加热。汽轮机分为背压式和冷凝式，前者的容许出口压力400lb/in<sup>2</sup>g，后者工作压力低于大气出口压力。驱动汽轮机用的蒸汽可自直接燃烧的锅炉或余热锅炉中产生。气体和蒸汽膨胀机的典型应用：

- 发电
- 压缩机驱动
- 泵驱动
- 风机驱动

### 热泵

在本节以上讨论的各种产品中我们发现，余热都是从一个热流体传向另一个较低温度的流体。热能自然地“向下”流；也就是说从一个高温的系统流向一个较低温度的系统。这种情况可以用很多方式科学地表达出来；都是热力学第二定律的不同表述方式。这些论述的实际意义就是说，热能经过一再变换，从一个系统传到另一个系统，它的用处就愈来愈小。最后，热能的密度变得很低（以如此低的温度驻留在一介质中），而不再能完成任何有用的功能。在工业生产中作为一般的经验规则，温度低于250°F的流体，已无抽取余热的价值；烟气不能冷却到250°F以下（或更好是300°F，以提供一安全的临界值），因为那样会有腐蚀性液体冷凝的危险。但是，在燃料价格不断上涨的情况下，这样的余热可以经济地用于采暖及其它低温用途。有可能利用一种叫作热泵的

热力学系统使自然的能流反方向流动。

这种装置由两个热交换器构成：一个压缩机和一个膨胀装置。一种液体或纯化学物质的液体与蒸汽混物流过一蒸发器，吸收其中的低温热能，并在此时完全蒸发。低温蒸汽被一压缩机压缩；此压缩机需用外部的功。对蒸汽所做的功使其压力和温度上升，而达到其热能变得有用的程度。蒸汽流过一冷凝器，冷凝成液体而释放热能。然后液体通过装置膨胀而返回蒸发器，循环重新开始。热泵是作为采暖系统而研制的，利用一电机驱动的压缩机做压缩功，而将大气、水或土地中的低温热能提高到采暖系统的温度。热泵的性能用性能系数COP来表示，定义为：

$$COP = \frac{\text{冷凝器中传送的热}}{\text{压缩机做的功}}$$

在理想的热泵中即为

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad 1-9$$

式中 $T_L$ 为从低温介质中抽取的余热的温度， $T_H$ 是由泵作为有用能量给出的热能的温度。性能系数表示了传热的经济性。

过去，热泵一般不在工业中应用。但是，有几家厂商现在开发家用热泵系统以及工业用的新设备。就这个意义而言，热泵的最佳应用还不太清楚，但是以较小的压缩功费用大量利用低级余热是完全可能的。

### 小结

表1-4列举了大多数通用工业热交换器的主要用途。可供选择时作快速的比较。表中给出的每种交换器的特性为：容许温度范围，传湿气的的能力，耐受大温差的能力，现成设备供货，对改造的适应性，紧凑性以及传热流体的容许组合。

至于湿气的回收，应强调指出，许多低温运行的热交换器，都会使冷却的气体流的蒸汽冷凝。必须采取措施从热交换器中排除这些冷凝液。

表1-4

工业热交换器的运行和使用特性

| 余热回收<br>设备规格 | 低温<br>零下-250°F | 中温<br>250-1200°F | 高温<br>1200-2000°F | 回收<br>湿气 | 允许<br>大温差 | 现成<br>设备 | 允许<br>改造 | 无交叉<br>污染 | 结构<br>紧凑 | 气-气<br>换热 | 气-液<br>换热 | 液-液<br>换热 | 特殊<br>结构允<br>许腐蚀<br>气 |
|--------------|----------------|------------------|-------------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| 传热设备<br>产品   |                |                  |                   |          |           |          |          |           |          |           |           |           |                       |
| 辐射同流换热器      |                |                  | •                 |          | •         | 1        | •        | •         |          | •         |           |           | •                     |
| 对流同流换热器      |                | •                | •                 |          | •         | •        | •        | •         |          | •         |           |           | •                     |
| 金属热轮         | •              | •                |                   | 2        |           | •        | •        | 3         | •        | •         |           |           | •                     |
| 吸湿热轮         | •              |                  |                   | •        |           | •        | •        | 3         | •        | •         |           |           | •                     |
| 陶瓷热轮         |                | •                | •                 |          | •         | •        | •        |           | •        | •         |           |           | •                     |
| 被动回热器        | •              | •                |                   |          | •         | •        | •        | •         | •        | •         |           |           | •                     |
| 翅片管热交换器      | •              | •                |                   |          | •         | •        | •        | •         | •        |           | •         |           | 4                     |
| 亮壳和壳管热交换器    | •              | •                |                   |          | •         | •        | •        | •         | •        |           | •         | •         |                       |
| 余热锅炉         | •              | •                |                   |          |           | •        | •        | •         |          |           | •         |           | 4                     |
| 热管           | •              | •                |                   |          | 5         | •        | •        | •         | •        | •         |           |           | •                     |

注1. 现成产品只有小容量的。

2. 矛盾的问题。有的权威宣称可回收。建议不依赖它。

3. 加清吹段可使交叉污染至1%以下。

4. 可用耐腐蚀材料制造，但发生漏泄或管子破裂给设备的严重危害必须加以考虑。

5. 容许温度和温差受到内部流体相平衡特性的限制。

### 参考文献

1. Waste Heat Management Guidebook, NBS Handbook 121, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402.

## 第2节 余热回收经济分析

公司企业对余热回收进行投资的意图，是希望最终的效益超过投资费用。当前使这种投资变得有吸引力的因素是燃料价格上涨以及正常燃料来源的缩减，这些会导致生产下降和改用其它能源。此外，强制性的污染控制和劳动力费用上涨削减了赢利，使公司企业更为注意寻求控制成本的途径。

从余热回收中可能得到的效益包括：

- 节约燃料  
降低加热/制冷设备尺寸，从而减少投资
- 降低现有设备的维护费用
- 降低劳力费用
- 污染抑制
- 改善产品
- 销售回收的热能或电能得到的收益

这些效益是根据对现有的应用情况进行一般了解后提出的。在所有的实例中，只有节约燃料一项是都存在的。其它效益，均只限于某些应用场合。

余热回收后用于代替新生产的热能或其它能量，就可以节约燃料。例如，烟道气的热能可以用省煤器回收，用于预热进水，从而减少蒸汽生产所需燃料量。

如果回收的余热降低了炉窑或其它加热/冷却设备所需容量，则有可能节省某些现有设备的投资费用（即余热回收所需以外的设备）。但另一方面，采用余热回收设备，由于给正常设备施加了更高的温度负荷，而使其投资费用增加。例如，在高通风需要量的建筑物上安装屋顶热回收设备，可使建筑物的供热和制冷系统的尺寸和投资费用大为

降低。这种节能潜力大概只限于新厂房安装，在热交换器的工业应用中未受到很大重视。

在某些情况下，现有设备维修量的减少，亦是余热回收投资的又一种效益。对现有设备维修工作的主要影响多半来自余热回收投资的规划、设计和安装阶段，因此时常对现有设备和生产过程进行详细核查。现存的缺陷会被发现和纠正；改进的维护方法会推广到现有设备上去。当然，没有余热回收，单独对现有设备进行检查，亦可达到同样的效果，但余热回收规划是对检查工作的促进。而且，如果检查工作与余热回收规划联合进行，则获取数据资料的费用可大为减少。降低维护费用的余热回收项目还有一个附加的好处，即降低了烟道气的温度。

余热回收投资的另一种效益是节省劳力费用。例如，用余热预热助燃空气，可缩短炉窑的转换时间（即生产改变时改变炉温所需的时间），从而节约劳力。用类似方法实现的炉窑起动得以加快，也可节省劳力。由于劳力停工时间减少，单位劳力费用降低。

（炉窑在非负荷时间中的更高温度的热备用与炉窑起动期间工人的停工之间存在折衷。如果现有的作法是使炉窑以更高的温度热备用以避免停工，则回收余热预热空气得到的节约，不是劳力费用降低，而是燃料的节省。）

污染控制是余热回收可能得到的一个附带效益。例如，纺织厂的污染控制过程常常由于余热回收而易于实现。污染物（增塑剂）一般是用炉子的循环空气通过静电除尘器收