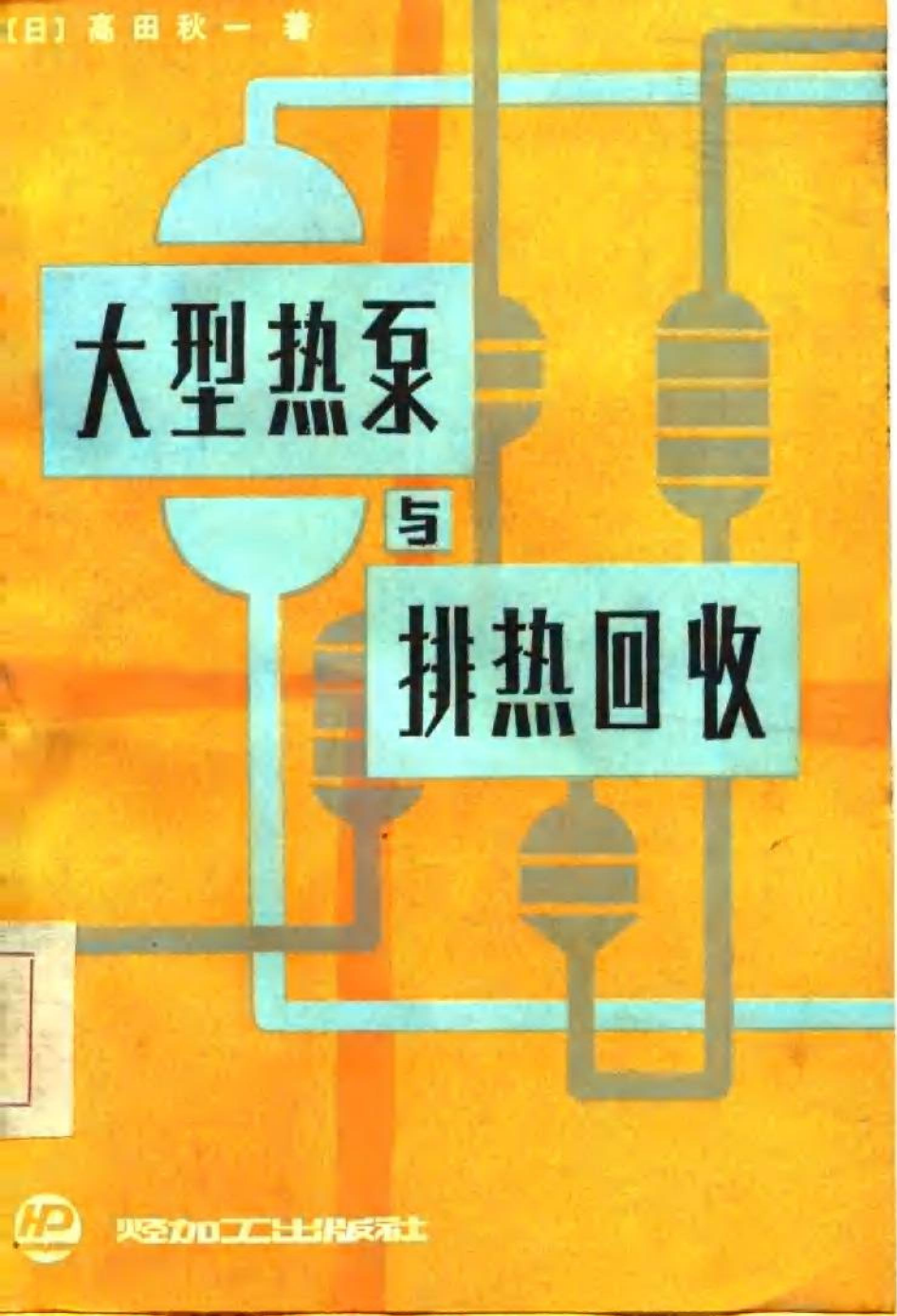


【日】高田秋一 著



大型热泵

与

排热回收



烃加工出版社

内 容 提 要

本书着重论述了热泵的工作原理与特性,并结合排(废)热的利用论述了采用大型热泵的可行性与经济性。书中对热泵的设计、自动控制与维修等方面技术知识,以及热泵在民用建筑、石油化工、轻工、电力、冶金等领域中的实际应用都作了详尽介绍。

本书不仅适用于冷冻、空调专业人员阅读,同时对从事排热利用及节能工作的其他专业人员也具有一定的参考价值。

大型ヒートポンプと排熱回収

高田秋一

《冷凍空調技術》(Vol.26No.305~Vol.28No.334)

(1975.7~1977.12)

大型热泵与排热回收

〔日〕高田秋一 著

林 毅 译

轻工业出版社出版

(北京安外大街33号)

交通印刷厂排版

北京海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 开本 13¹/₂印张314千字印1—2,700

1986年10月北京第1版 1986年10月北京第1次印刷

书号: 15391·28 定价: 2.30 元

前 言

一九七三年以来，由于石油危机，加之环境的污染，使节能问题被重视起来。但是，有关节能技术的开发规划，无论政府方面，还是企业界都还没有提出过具体的方案。对节能技术的开发方法，通产省的咨询机构——产业技术审议会的能源技术特别部会（部会长是土光敏夫经团连会长）曾组织过讨论研究，并以《节能技术的开发方法》为题，归纳整理成报告，发表于一九七五年二月二十四日。

上面所提及的技术开发，其核心问题是如何尽可能地提高能源的利用率。具体地讲，首先要改善锅炉、工业炉的耐热、绝热材料，以提高其热效率。其次，要大力开发新的生产工艺，以提高工艺过程的效率。例如：钢铁工业要开发直接还原的炼钢技术，铝金属工业要开发新的精炼技术等。再进一步，就是要有效地利用排热系统及热泵等设备，从而有效地利用废热。在日本，作为废热排出去的能量约占日本总能耗的百分之五十左右。

该部会预定于七月中回答“产技审”的中间咨询，然后，正式回答通产大臣的咨询。就政府方面来说，这样具体地过问节能技术的开发问题，还是第一次。

在上述的报告里，对节能技术中应用面广、经济效果比较大的，作为重点开发的课题有四十项，其中有关热泵以及排热利用的课题有以下几项：（1）大型热泵；（2）热回收热泵；（3）排热的有效利用；（4）低温度循环；（5）热电联合供给

系统；(6)利用工厂排热的联合系统；(7)利用工厂排热的就近区域性供冷暖系统；(8)利用低温的排热系统。

笔者从事热泵的设计达三十多年之久，还从未见过热泵的利用象现在这样被重视，甚至于国家还出面组织讨论这方面的问题。尽管热泵这样逢时，但至今尚无人将设计热泵系统的参考资料编著成书，对此，笔者作为热泵设计人员早就感到不便。

对热泵，笔者有幸掌握了相当多的各种学会、协会、工业杂志，以及讲习会上发表的资料，还有一些国内外的论文报告。现将这些文献资料加以整理编排，分为以下十章进行介绍，以供大家参考。

- 第1章 热泵与排热回收
- 第2章 离心式热泵
- 第3章 吸收式热泵
- 第4章 利用排热水的吸收式制冷机
- 第5章 热泵式透平
- 第6章 离心式热泵的特性与控制
- 第7章 辅助设备
- 第8章 热泵在空调上的应用
- 第9章 在其它方面的应用
- 第10章 排热回收与热泵存在的问题

不消说，由于笔者的学识浅薄，本书难免有许多错误之处，望读者给予批评指正。倘若此书对热泵系统的设计有些参考价值，对笔者将是莫大的欣慰。

编著此书，参考了许多国内外的论文报告、样本资料等。在此，向这些论文资料的执笔者，以及提供这些样本资料的制造厂深表感谢。

目 录

前 言	1
第 1 章 热泵与排热回收	1
1.1 排热的回收	1
1.2 由冷媒透平产生动力	13
1.3 通过吸收式制冷机制冷	31
1.4 通过热泵将低温的热能提升为高温的热能	42
第 2 章 离心式热泵	52
2.1 热源的最佳温差	53
2.2 节能器的循环	57
2.3 过冷循环	63
2.4 离心式压缩机的理论	67
第 3 章 吸收式热泵	75
3.1 吸收式制冷机的理论	75
3.2 第一种吸收式热泵	95
3.3 第二种吸收式热泵	100
第 4 章 利用排热水的吸收式制冷机	110
4.1 低温排热水的利用	110
4.2 高温排水的利用	119
第 5 章 热泵式透平	132
5.1 制冷与动力的产生	132
5.2 径流式透平的输出功率	133
5.3 不满负荷特性	137

5.4	各构成部分的特性	138
5.5	感应发电机	141
5.6	透平工作的条件	152
5.7	透平机的发电量	155
第 6 章	离心式热泵的特性与控制	159
6.1	离心式热泵的特性	159
6.2	系统阻抗线	162
6.3	容量的控制	165
6.4	各种容量控制法的比较	177
6.5	单段与多段的比较	178
6.6	起动特性	179
6.7	吸收式热泵的特性	180
6.8	第一种吸收式热泵的容量控制	196
6.9	特殊吸收式热泵的的容量控制	201
6.10	第二种吸收式热泵的容量控制	204
6.11	安全控制	208
第 7 章	辅助设备	218
7.1	离心式热泵的辅助设备	218
7.2	润滑装置	219
7.3	抽气回收装置	222
7.4	泄料装置	223
7.5	电动机的冷却装置	226
7.6	节能器	228
7.7	防止冷媒过热的装置	230
7.8	冷媒配管及其附件	232
7.9	侧线冷凝器	235
7.10	吸收式热泵的辅助设备	237

第 8 章	热泵在空调上的应用	244
8.1	空调用离心式热泵的种类	247
8.2	蓄热式热回收热泵	254
8.3	带侧线冷凝器与双操作的热回收式热泵	263
8.4	带侧线冷凝器与双操作的热回收 热泵的控制	266
8.5	带侧线冷凝器与双操作的热回收 热泵的运转方法	267
8.6	密闭方式	268
8.7	热回收与热泵的组合	272
8.8	串级方式	275
8.9	单元式热回收方式	278
8.10	利用空调及供热水以外的热水回收系统	284
8.11	冷藏柜与排热回收	297
第 9 章	在其它方面的应用	303
9.1	地下变电所的废热利用	303
9.2	发电厂凝汽器冷却水的废热利用	306
9.3	太阳能供冷暖热泵的应用	311
9.4	家庭排水的热回收	315
9.5	以大地为热源的热泵	317
9.6	在蒸发器等设备上的应用	321
9.7	在废水处理方面的应用	341
9.8	在干燥装置上的应用	357
9.9	各种炉子排热的利用	359
第10章	排热回收与热泵存在的问题	362
10.1	可行性研究	362
10.2	效率的提高	384

参考文献.....	420
附录 非法定单位与法定单位换算系数表.....	423

第 1 章 热泵与排热回收

1.1 排热的回收

由于重油等能源的危机，使工业发达的国家不得不重视节能的问题。节能方法大致分为下列两种：

- a. 合理、高效地利用能源；
- b. 对耗能后必然放出的低温位热能（如排热）再加以有效地利用。

从前，因经济的原因，只有能取得足够温度差的、转换效率和利用效率都比较高的排热系统，方能成为排热回收的对象。然而，在能源状况恶化，价格上涨的今日，仅那样做是不够的，还得进一步扩大范围。

也就是说，对象炼油、石油化工、化工、炼铁、炼钢工业过程中所排出的热气体（温度多半为 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，气体透平、内燃机所排出的气体温度更高）和热水（ $150\sim 80^{\circ}\text{C}$ ），地热发电喷出蒸汽所夹带的热水（ $150\sim 80^{\circ}\text{C}$ ），以及原子能发电厂和供暖的建筑物所排出的温度较低的热量，都应加以有效利用。现今，关于建筑物的排热已经采用了“爱考诺卡德”（商品名）等形式的换热器，或热泵设备进行回收，即利用排气的热量来提高进气的温度（亦通过排进气间的换热）。

排热回收装置，如按转换后的能量种类分类，则可分为：

- a. 通过热交换转换为温度较低的热能；

- b.通过冷媒透平产生动力;
- c.通过吸收式制冷机制冷;
- d.利用热泵转换为温度较高的热能。

1.1.1 热交换方式

关于顺流、逆流、错流换热的优缺点，至今还处于辩论中。这里，为了再认识一下其优缺点，不妨再讨论一下。图1-1所示为介质的流动与温度的变化关系，由图可以明显看出，顺流，介质间的温度差沿着传热面而减小，终端温度，给热侧必比受热侧高。逆流，介质间的温度差大致是一定的，而终端温度，受热侧能比给热侧高。错流，如图示其出口温度为 t_A ， t'_A 以及 t_2 ， t'_2 ，不是一个定值。

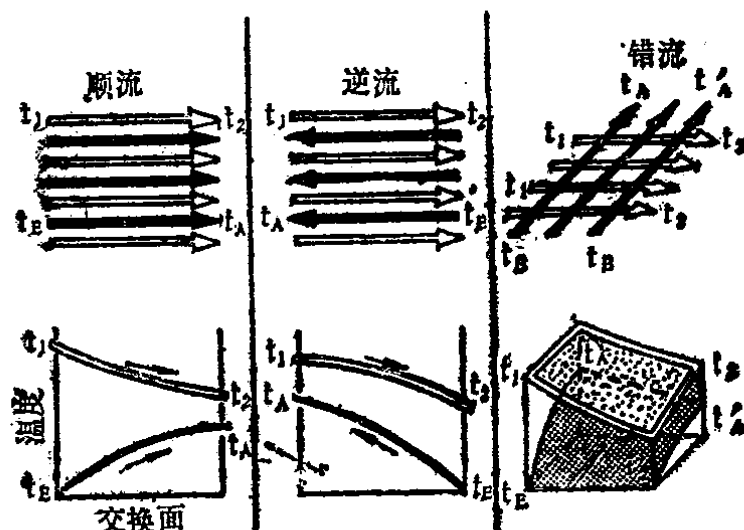


图1-1 换热方式

由下面的简单例子可见，介质的流动方向对壁温影响很大。譬如：套管换热器，其管内走烟气，管间走要预热的空气，烟气入口温度为 1300°C ，出口温度为 800°C ，空气由 0°C 被加热到 500°C 。假定热阻不变，即壁温按气体温度的算术平均值进行计算。在这种情况下，当上述两个介质的流动方向为顺流时，整个壁温基本上一样，为 650°C ；而当流动方

向为逆流时，进出口处的壁温就相差很大，在入口 处 为400℃，出口处则达900℃。

对金属材料来说，一般当壁温达到600~700℃，就会急剧产生高温氧化的现象，缩短装置的寿命。因此，通常要使用添加铬和镍的金属材料，这种材料具有耐热、耐腐蚀的性能。一般在高温的情况下，换热面的损伤很大。对烧重油的炉子，还存在着钒或碱性的侵蚀问题。这些问题，都是应加以考虑的重要问题，另外，在温度较低的部位还有 硫磺 腐蚀。在选择材料时，都要把这些问题考虑进去。

1.1.2 液体换热器

液体对液体的换热器有许多种。一般采用管壳式，这种形式的换热面容易制作。图1-2所示是此形式的标准 情况。其中，直管逆流换热器，其管中适于走有污染的介质。拆下其封头，可清扫管子。当采用顺流来获得所需要的效果时，其换热面必需具有相当的长度，因此，在这种情况下，最适于采用 U形管式的顺流换热器。它的优点是，由热膨胀所引起的热应力，不会作用到胀管处。

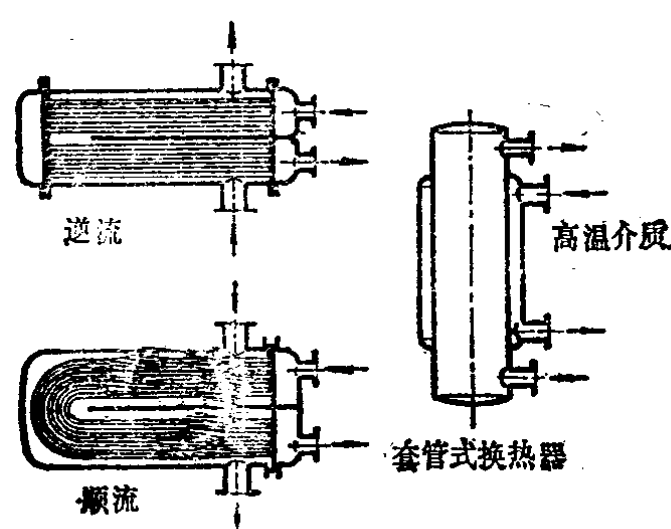


图1-2 液-液换热器

在欧洲，广泛用于家庭的换热器如图1-2所示，为套管式供热水器。从设备构造简单，投资少考虑，每户装设的这种换热器，均由区域性供暖的供热厂供给高温的加热介质，每户用自来水通过与该高温介质换热，即可得到自己所需的热水。

上述的三种换热器，加热介质都可采用蒸汽。但考虑排出凝结水方便，蒸汽也可走管外。

1.1.3 气体换热器

此种气体换热器，广泛用于预热燃烧用空气，其加热介质采用的是燃烧装置的排热。这种换热器，若用于排用相结合的排热回收装置，即，将其所产生的排热再利用于发生源的装置上，是最经济合理的。

燃烧装置的烟气量与燃烧空气量基本上成正比，其温度也大致恒定。因此，如将烟气的热量用来预热燃烧用空气，则可满足上述条件，成为理想的排热回收装置。这里所使用的气体换热器都是标准的换热设备。

气体换热器按工作原理分类，可分为蓄热型与换热管型。蓄热型是利用高温排热将蓄热介质加热并把热蓄起来，然后，让空气或燃烧气通过蓄热介质而被加热的方法。蓄热介质有固定不动，和连续运转的两种，换热管型是通过换热面直接进行换热的方法。

(1) 蓄热型

在平炉、玻璃熔融炉中称为蓄热室的就是这种蓄热型。蓄热室有两个，一个室导入高温烟气加热蓄热体时，另一个室则导入燃烧用空气，空气通过蓄热体而被加热。经过一定时间（约二十分钟），因加热的蓄热体冷却了，所以用切换阀切换成反方向的流动（图1-3），从此，燃烧用空气通过

被加热的室，烟气则通过另一个室，加热已被冷却的蓄热体。蓄热体是用耐火材料制作的。传热在蓄热体与气体之间以对流为主。因为在稳定状态下流动为逆流，所以可获得较高的最终温度。蓄热型与后述的换热管型比较，虽然投资费用大，但对钢以及玻璃熔融炉，多半因下列原因而采用这个形式：

- a. 因为用的是耐火材料，能耐高温；
- b. 即便有高湿度的二氧化硫，氟素气体，也能耐腐蚀。

蓄热体有许多种填充的方式，各种方式都应有较为大的表面积。图1-4的上图所示是最简单的填充例子。下图是蓄热体的表面温度在一个循环（开始导入烟气的加热期与开始导入燃烧用空气的冷却期）中的变化曲线。

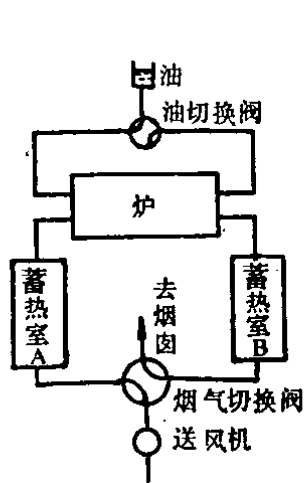


图1-3 蓄热器的热风切换

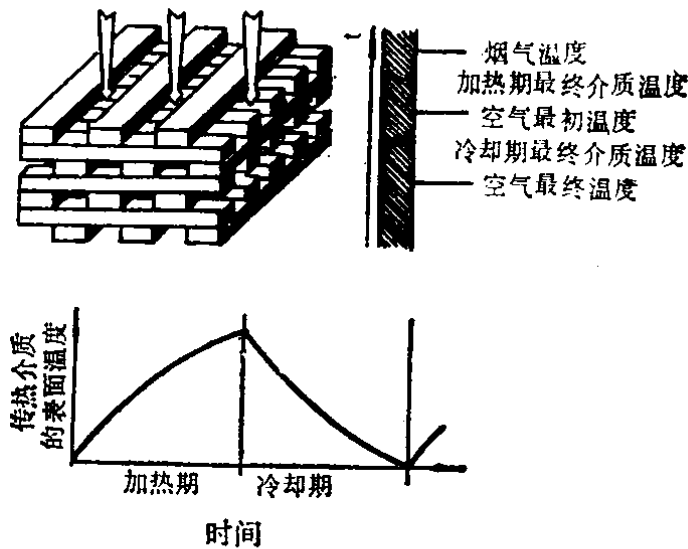


图1-4 蓄热型

不是采用切换气体流动的方向，而是依靠旋转蓄热体，使冷却与加热交替进行的这种方法，大家知道，有以扬·斯特洛姆（Ljung Strom）命名的扬·斯特洛姆型蓄热器（图1-5）。这种旋转式换热器，主要用于锅炉烟气与燃烧用空

气的换热。这种换热器由高温到低温的区域是作为排热回收器使用的。可作为蓄热体的材料有许多种（纸、钢毛、薄板成形品、石棉等），应按使用目的进行选用。

在空调方面，如所周知，有称埃考诺卞恩特的蓄热器，广泛使用石棉纸作为蓄热体。建筑物的排气，在夏季，将导入的室外空气冷却，在冬季，则将室外空气加热。还有，利用浸透溴化锂溶液的石棉纸的吸湿性，可进行排气与导入空气之间的湿度交换。在冬季，导入的室外空气被加温加湿，在夏季，则被冷却减湿。

旋转式换热器的中心处有分隔板，其一侧导入室外空气，则另一侧排出排气，因此，不容易混进尘埃等脏物，温度控制可通过改变旋转数来实现。潜热、显热的换热效率因风速而异，可达70~80%。

(2) 换热管型

这种形式，按传热原理分类，可分为以下两种基本形式，即对流式和辐射式两种。对流管式换热器应采取较高的气体流速。图1-6为钢管管束构成的例子。冷风进入管内，

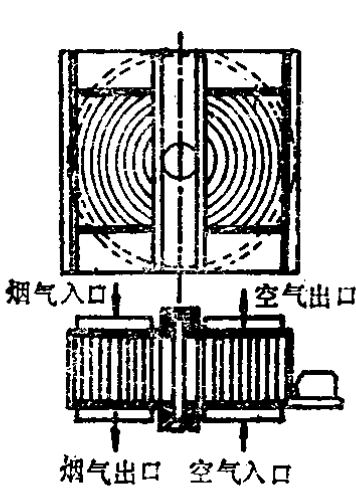


图1-5 工业炉用扬·斯特洛姆型蓄热器

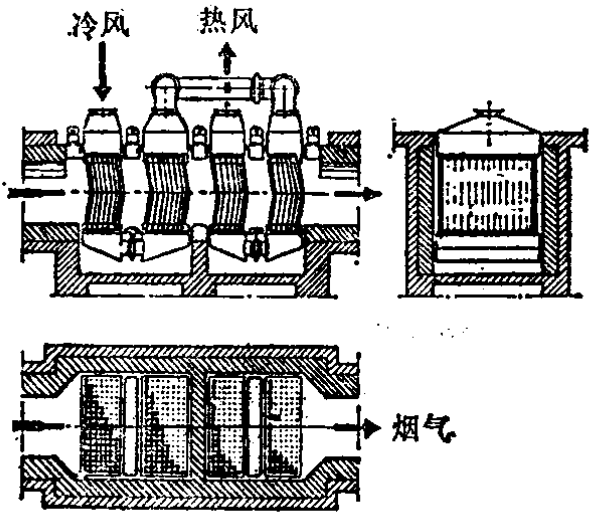


图1-6 对流钢管式换热器

与由风箱来的烟气成直角流动，经折流流入下一束钢管。取小口径钢管，以提高管内流速。烟气通路做成窄小的通道，也是为了提高流速。压力损失，通常在空气侧为100~200毫米水柱，烟气侧为50毫米水柱。为不使管壁温度超过所需要的温度，而采取顺流。因此，尽管烟气温度高，但是最终的空气温度比较低。终端的管束材料，必须使用能耐此温度的材料。对有磨损性的烟气，有时采用特种铸铁管，特种铸钢管。这种场合，在管内外表面装有针状突起，以增大传热面积。各个换热单元采用焊接或螺栓连接，以组成一个整体换热器。特殊情况下，也有用陶瓷材料的。

对气量大的，温度高于1100℃的烟气，近来采用辐射套管式换热器。此种形式的优点之一是烟气几乎没有涡流损失。图1-7是该种设备构造的断面图。通常，高度约为四十米，直径为三米。

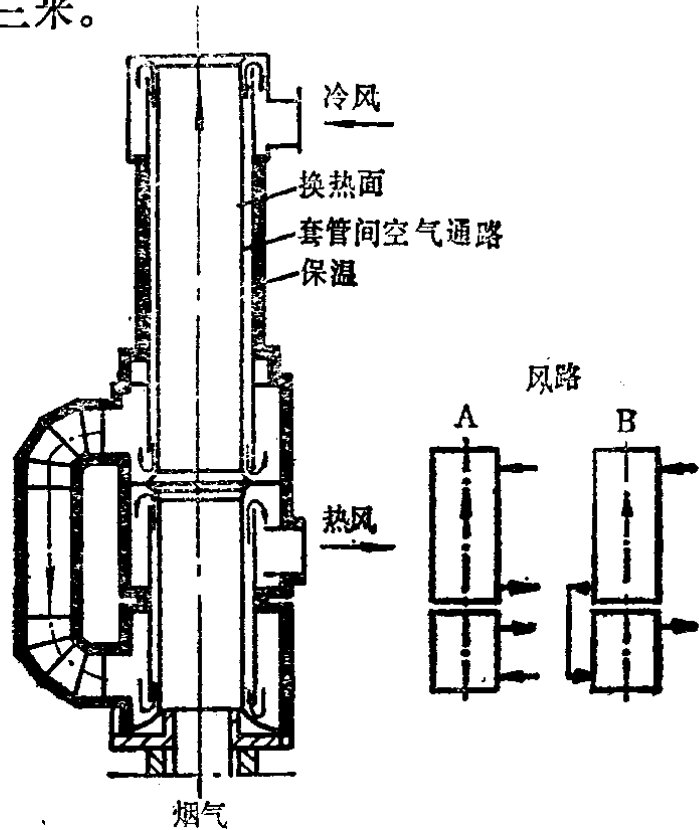


图1-7 热辐射套管式换热器

除固体以外，还有水蒸气、二氧化碳等气体，都具有红外线辐射能力。通过热辐射传递的热量，由气体温度和具有热辐射能力的气体的容积比（亦气体的分压）所决定。假设烟气中的水蒸气含量为20%，CO₂为10%，采用内径为三米的热辐射套管式换热设备进行换热的话，因靠烟气辐射所传递的热量极大，所以，可不考虑对流的作用。

图1-7中，上部为逆流，下部为顺流，被加热的气体以高速流过环状的狭窄通道的套管辐射式换热器。

运转时，换热面承受外压。另外，因换热面可达800℃，所以，必须考虑热应力问题。因此，设备直径不能做成大于三米的。为避免外压，假如不采取送风式，而采取抽风式，即采取抽风机把高温气体抽出去，则问题将转移到抽风机上，并且，还需要较大功率的电动机。

1.1.4 利用流体与蒸发的排热

作为传热介质，因单位重量的液体体积比气体体积小得多，所以，液体能以较小的容积贮存大量的热量。这是有利的。传热介质在输送过程中有蒸发现象不好，因此，需采用高压下的高温水，或高沸点的油以及金属盐等。在此，特就蒸发冷却的可能性，论述一下。

（1）蒸汽装置

图1-8所示为水与水蒸气的状态值，根据压力可查得饱和温度（左纵坐标），以及水与水蒸气的焓值。所谓饱和温度就是：在一定压力下蒸发开始的温度，此温度直到液体全部蒸发完以前都保持不变。但是，我们从自然蒸发现象可以知道，蒸发过程不一定按图1-8的压力所对应的饱和温度进行。图下部的曲线表示水的，上部的表示完全蒸发为水蒸气的焓。两曲线之间为水与蒸汽的混合区域。锅炉加热管内就

呈这种状态，水与蒸汽的比率随加热量的多少而异。

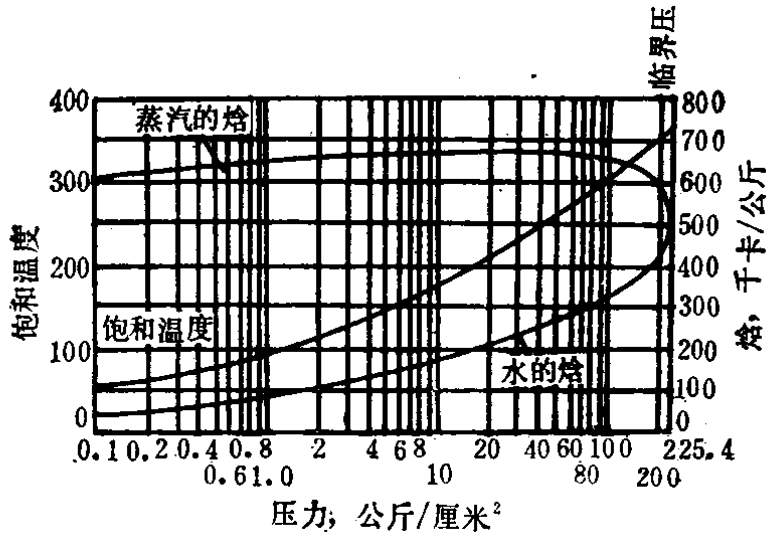


图1-8 水与水蒸气状态图

根据强度要求，有时需将工业装置的构造材料进行冷却，这种冷却基本上是采取冷却水一次通过的方法。如将冷却水温度提高，即用热水或热水与蒸汽的混合物进行冷却，就可扩大排热利用的范围。因钢材冷到400℃左右，其强度变化不大，所以，冷却介质可采用热水或热水与蒸汽的混合物。采用后法则称为蒸发冷却，现将采用蒸发冷却的设备或设施例举如下：

- a. 熔融炉；
- b. 炉子的烟气风门以及烟道调节阀；
- c. 压力式连续加热炉；
- d. 转炉；
- e. 高炉。

图1-9是压力式连续加热炉用的蒸发冷却的示意图。如以汽水分离器为循环的始点，则水被循环泵吸入，并送入加热管中。在炉室内运送铁块用的滑动小车就是加热管。加热管由管子或管束构成，安装在炉内的支架上，对送入炉内的