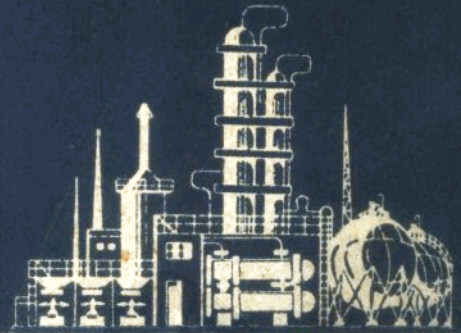


147463

5842
37177

废热锅炉



兰州石油机械研究所

447463

废 热 锅 炉

成 都 工 学 院

广 东 化 工 学 院

南 京 化 工 学 院

抚 顺 化 工 学 院

甘 肃 工 业 大 学

兰 州 石 油 机 械 研 究 所

合 编

(只 限 国 内 发 行)

1975

兰 州

内 容 提 要

本书主要介绍了目前国内外废热锅炉的发展概况,包括典型流程及经济意义、结构特点、材料工艺、操作管理和工业应用。着重叙述了石油化工中废热锅炉的结构设计,强度计算,热力、阻力和水循环计算,材料、运行、给水及清洗等。对燃气轮机的废热回收和冶金用废热锅炉的某些问题也作了简要说明。

本书共七章,包括329幅图片和147张表格,提供了若干有关的技术数据和应用实例,可供从事废热锅炉的研究、设计、制造和使用方面的有关人员参考。对于有关专业的高等院校师生也有一定参考价值。

废 热 锅 炉

兰州石油机械研究所出版

(兰州市七里河区敦煌路167号)

七二一九工厂印刷

开本787×1092毫米^{1/16}·印张27^{1/2}字数686千字

印数:3000

定价:3.00

前 言

废热回收是能量综合利用的重要内容之一。近年来,在国外随着石油化工的迅速发展,废热回收受到了普遍的重视,获得了较快的发展。例如,某些石油化工企业,由于废热回收比较充分,实现了本厂的动力和热能的自给或部分自给,从而大大节省了运行费用,降低了生产成本。

我国有着丰富的煤、石油和天然气,为我国社会主义革命和社会主义建设提供了充分的自然资源。但是我们仍然必须遵循毛主席关于“综合利用很重要,要注意”的一贯教导,开展综合利用,变废为宝。

目前,废热回收虽已引起国内各有关部门的重视并取得了一定成绩,但尚处在初步发展阶段。例如,合成氨中的废热回收,国内现只能产生 25 公斤/厘米² 的低压蒸汽,而国外却可产生 100~150 公斤/厘米² 的高压蒸汽,供动力用,以驱动蒸汽透平。

废热锅炉是废热回收系统中的主要设备。在石油化工厂中,它同时还是一种不可缺少的工艺设备。由于它处在高温、高压和常常是有腐蚀性的恶劣条件下,因而对其结构和材料都提出了特殊要求,这就给设计、制造及操作带来了某些困难。

为了配合 30 万吨/年合成氨及 30 万吨/年乙烯工厂的建设和发展,帮助有关同志了解国内外废热锅炉的概况,以便为研究和设计新的更加先进的设备提供参考和借鉴,我们组织有关单位,共同编写了《废热锅炉》一书。书中内容,主要取自国外文献资料,但也包括部分国内的材料。

直接参加本书编写工作的有:成都工学院古大田同志,广东化工学院黎廷新同志,南京化工学院庄骏同志,甘肃工业大学钟永隆同志,抚顺化工学院唐立夫同志和宋贵良同志,兰州石油机械研究所任书恒同志、胡华燃同志和吴长春同志。

北京化工学院化机系曾参与了查阅资料线索和有关法文资料的翻译,为本书的编写作了很多工作。

编写中,还得到了兰州石油化工机器厂工人大学和兰州石油学校杨炎生同志的支持与帮助。在此,谨一并致谢。

由于水平所限、时间仓促,编写中一定有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

一九七五年五月

(after 18/10)

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 废热回收与废热锅炉.....	(1)
第二节 典型废热回收的流程及经济意义.....	(3)
第三节 废热回收的发展简史和趋向.....	(15)
第四节 废热锅炉设计的一般要求.....	(20)
第二章 废热锅炉的 结 构	(24)
第一节 石油化工用废热锅炉的结构特点.....	(24)
第二节 结构类型及其适用场合.....	(25)
一、管壳式废热锅炉.....	(26)
二、烟道式废热锅炉.....	(91)
第三节 废热锅炉的某些局部结构.....	(98)
一、管板.....	(98)
二、高温介质入口部的热防护装置.....	(100)
三、管子与管板的连接.....	(106)
四、高温入口气体分布室.....	(109)
第四节 结构设计中的一考虑.....	(112)
第三章 废热锅炉热力、阻力和水循环计 算	(116)
第一节 热力计算的特点、目的和步骤.....	(116)
第二节 混合气体物性的计算.....	(118)
第三节 热平衡计算.....	(122)
第四节 传热计算.....	(125)
第五节 管壁温度和临界热负荷.....	(133)
第六节 气侧流速和出口温度的选择.....	(136)
第七节 气侧阻力计算.....	(140)
第八节 水循环计算.....	(143)
第四章 废热锅炉零部件的强度计 算	(178)
第一节 圆筒形零件.....	(185)
第二节 封 头.....	(208)
第三节 开孔的补强.....	(219)

第四节	法兰连接	(230)
第五节	波形膨胀节	(242)
第六节	椭圆形集流管	(256)
第七节	管 板	(259)
第五章	废热锅炉用材料	(283)
第一节	金属材料的基本性能	(283)
第二节	国外废热锅炉用金属材料概况	(296)
第三节	国外废热锅炉用金属材料的性能	(304)
第四节	国内废热锅炉用金属材料	(333)
第五节	烟气进口管、联箱及管板防护用耐火材料	(346)
第六章	废热锅炉的运行、给水及清洗	(350)
第一节	运 行	(350)
第二节	给 水	(353)
第三节	清 洗	(366)
第七章	燃气轮机排气废热锅炉	(382)
第一节	回收燃气轮机排气热的意义	(382)
第二节	燃气轮机排气热回收的性质和特点	(384)
第三节	燃气轮机排气废热锅炉的结构	(388)
第四节	典型燃气轮机排气废热锅炉	(394)
第五节	燃气轮机排气热回收系统的应用实例	(398)

第一章 概 述

第一节 废热回收与废热锅炉

一、能量综合利用的意义，

废热回收在能量综合利用中的作用和地位

当今世界的能源，不外是煤炭、石油、天然气、水力和核子能。但是核能利用多被“美苏两霸”所垄断，作为争夺“核霸王”、扩军竞赛、搞核讹诈的资本，核能发电仍处于初步阶段，为量极少。水力资源受自然环境限制，有的尚待开发。因此，绝大多数的能量来源，都是依靠煤炭、石油和天然气。

目前，随着我国工农业的不断发展，交通运输业的不断扩大，煤炭、石油和天然气，不仅是主要的能源燃料，而且也是重要的化工原料，因此消耗量也不断增加，从长远看，开采量仍满足不了高速发展的祖国社会主义建设的需要。而且这些原燃料来之不易，是花费了巨大的劳动才得来的，因此，如何将它们充分利用，避免浪费，确是值得研究的有重大意义的课题。毛主席教导我们：“节省每一个铜板为着战争和革命事业，为着我们的经济建设”，“厉行节约，反对浪费”。我们必须遵循这些教导办工业企业，不能对工业上大量的能量浪费熟视无睹。

要使能量得到充分利用，不致浪费，必须综合利用。毛主席又教导我们：“综合利用很重要，要注意”，这是指路明灯，是方针，我们在做工业企业的工艺设计和设备设计的时候，必须坚决贯彻。

为了做到能量综合利用，必须把设备与设备、车间与车间、工厂与工厂联合起来，甚至把工业与城、乡联合起来考虑，把此一设备、此一流程、此厂此地无法利用的剩余能量，用到条件适合的另一设备、另一流程，或者另一厂和另一地方，最终达到提高其利用率的目的。

在现代的工业生产中，可供回收的“废能量”，最普遍而数量最大的是热能（废热、废燃料），其次是压力气体或高压水等需要降压时的动能，但后者不常碰到。因此，废热回收在能量综合利用中占着非常重要的地位。

有的废气或废水，其中不但含有显热，而且含有废燃料（如 CO 、 H_2 、 H_2S 、 C 、已内酰胺等），这些废燃料有的是有毒的（如 CO 、 H_2S 、已丙酰胺等），因此将它们燃烧回收了废热之后才排入大气或放于河海，是既利用了热能，又可避免污染大气或河水，以保障人民的卫生健康，这是废热回收的又一作用。当然，燃料浓度过低的废气或废液，在回收废热时还得加辅助燃料或将废液预先浓缩。

必须指出：在资本主义国家里，他们在不遗余力地搞能量回收、废热利用，他们在这方面的某些技术可能比较先进，但是他们搞能量回收的目的，为的是高额利润、竞争、垄断、以及掠夺弱小国家。我们搞能量回收的目的是为的“备战、备荒、为人民”，为的节省燃料，提高总效率，降低产品造价，为社会主义建设积累更多资金，多快好省地建设社会主义，“为全国人民和全世界人民服务”。同是技术，目标两样，这是两种社会、两种制度的必然反映，因而对于吸取他们的技术，就有一个“洋为中用”的问题。譬如他们都趋向于搞大的联合企业的废热综合利用淘汰小的企业。我们的工业建设方针是“两条腿走路”，我们不但有大型厂矿，而且有成千上万的小型厂矿，因此对小型厂矿的废热回收也不能忽视，应该是和大型企业一样的重要。我国的小型氮肥厂就有千余个之多，总产量占全国氮肥产量的50%以上。小磷肥厂也不少，其总产量占全国磷肥产量的3/4左右。因此，对于这一半以上的产品降低生产消耗和费用，降低售价，对于支援农业将起到多么重大的作用！总之，搞废热利用不但是一个经济问题，而且也是一个政治问题，是贯彻毛主席革命路线的重要问题。

回收废热的方法各式各样，设备类型也种类不同，但用得最多的关键设备就是废热锅炉——一种特殊的换热器。本书将着重予以介绍和讨论。

二、废热锅炉及其主要特点

废热锅炉和普通锅炉差不多，一般由省热器（给水预热器）、蒸发器（汽包、上升管、下降管）和过热器等部分组成，有的还配合蒸汽透平设有回热器。但是，由于废热锅炉的热源一般不是用燃料（废燃料除外）在锅炉中直接燃烧而产生，而是利用某些生产过程中的剩余热量或必须取走的热量，这些热源的温度有高有低，有的高达1500℃以上，有的则低到300℃以下，并且这些热源一般比较分散，因此废热锅炉一般就不能再像普通锅炉那样把这些换热器组装在一个壳体内。在设计时，为了节省投资和检修方便，应尽量考虑把它们配置集中在尽可能少的地点，这是完全必要的^[2]。当然在某些只有一个高温热源的情况，废热锅炉也和普通锅炉一样，就是一台整装锅炉。

除了上述这一特点而外，废热锅炉还有以下特点：

由于废热锅炉所用的热源极广，因而废热载体的组份也各种各样，有的和燃烧烟气组份差不多，有的则含有腐蚀性极强的组份（如 SO_2 、 SO_3 、 NO_2 、 NO 、 H_2S 、 CH_4 、 H_2 、 NH_3 等），因而腐蚀问题比普通锅炉严重得多。由于露点关系，因而这些废热气体的出炉温度也受到限制。

有的废热气体夹带有大量半熔状态的粉尘或烟息，因而使废热锅炉在高温区域和水冷壁上结灰或结焦，以致如果没有设计完善的除灰清焦装置——如“伸缩形吹枪”、“锤打装置”、“水枪”、“烧焦装置”等等，废热锅炉就不可能投入实际的运行，也就将不可能利用废热锅炉来回收热量^[6, 24]。

由于废热锅炉的各个换热器多半是分散安装在流程的各部位，互相之间的联系要求又非常高。锅炉水侧（或汽侧）的工作情况变化将通过传热面影响到工艺气侧的操作条件，以致于使整个流程产生连锁反应，影响到产量和质量。例如激冷冷却器（反应设备各反应段之间的内部或外部冷却器）或反应炉后冷却器，当给水量发生较大波动时，将影响传热而致工艺气温度上升或下降，保持不住本设备或下一设备的最宜反应温度，致使转化率下降，影响产量

和质量；还有，由于这一设备的减量，将继续影响到一连串后续设备的负荷；而且反应温度的经常波动还将降低触媒的使用寿命；兼之近代废热锅炉多趋向于搞成高温高压动力蒸汽锅炉，因而操作的可靠性、安全性、稳定持久性等就甚为重要。例如高压直流锅炉，给水泵断水不能超过约20秒钟，因此备用给水泵必须在这一时限内自动地迅速地投入生产，否则就会烧坏炉管，发生危险事故^[2]。由于以上原因，要使废热锅炉保证在稳定条件下，连续正常地运行，以保证工艺产品的质和量，自动控制调节机构和仪表等是相当重要的，有时甚至是必不可少的^[25、26、27、24、30]。关于废热锅炉的自动调节因为和通用锅炉一样，超出本书的范围，故不介绍。

在某些工业，废气中不但含有显热而且尚含有可燃物质（废燃料），如石油重整的催化剂再生气、燃气轮机的废气，其中都含有CO，这些贫热气体有的需用辅助燃料通过旋风废热锅炉以回收热能^[13]。再如己内酰胺废液是在生产用于制造锦纶（耐纶6）单体的己内酰胺时排出的，必须设计特殊的废热锅炉，将浓缩的己内酰胺废液进行喷射燃烧，才能回收蒸汽和碳酸钠（每吨废液可回收蒸汽2500公斤，碳酸钠165公斤）^[49]。

此外，在石油化工企业中，有的废热锅炉不但水侧或汽侧是高压或高温，而且工艺气侧也是高温或高压，因此，锅炉设备对紧密性的要求、结构材质的耐热性、热应力的避免、水质的要求等都很高^[7、13、14、22、24、28、29]。

上述这些特点，将影响到废热锅炉的结构设计、材质选择、热力计算、强度计算，以及操作维护和水质处理等。如何具体考虑和解决这些问题，将在以下各章节中详细介绍。

第二节 典型废热回收的流程及经济意义

一、废热锅炉在石油、化工、冶金、动力等工业中的应用概况

在国外，六十年代以来，随着石油、化工、冶金、动力等工业的发展，机器制造业技术的改进，在石油、化工、冶金等工业中，对高温废热的利用，都趋向于把以前的低压废热锅炉尽可能提高压力，改成高压过热蒸汽的动力锅炉，对温度比较低的废热，也尽可能设计成中压动力锅炉。高压锅炉的蒸汽压力一般在100公斤/厘米²以上，有的高达162公斤/厘米²，过热温度一般在400℃以上，有的高达580℃。把这样的动力蒸汽用来驱动大功率背压式蒸汽透平以拖动本厂所需的大型压缩机（离心式）或鼓风机（冶金高炉用），从背压蒸汽透平中间抽出的中压蒸汽，部份用在凝汽式中压透平发电以供应本厂的各种中、小型机器和照明之用，其余部分蒸汽则作为工艺蒸汽或加热采暖等用。这样一来，既省了燃料，又节约电力，使产品成本大大降低。因此废热锅炉在各种工业中——尤其是在废热数量较为巨大的工业中，获得了普遍的应用。例如在乙烯制造工厂，日本的30万吨/年的装置中，就用了许多淬冷废热锅炉以代替过去用油或水、或以换热器等的淬冷装置。表1是日本大阪、三菱、水岛和丸善四个工厂关于裂解炉和淬冷废热锅炉的台数和热负荷情况^[24、28]。

根据文献^[35]报导，乙烯废热锅炉的蒸汽压力通常都在94.2~126.7公斤/厘米²（表压）

表1-1

设备名称	大 阪	三 菱	水 岛	九 善
石脑油裂解炉	10(14)台/ 16×10^6 仟卡/小时, $P=1.07$ 公斤/厘米 ² , 现10台将扩至14台, $T=811^{\circ}\text{C} \sim 870^{\circ}\text{C}$	14台/ 20.32×10^6 仟卡/小时, $P=1.1$ 公斤/厘米 ² , $T=830^{\circ}\text{C}$	13台/ 16.45×10^6 仟卡/小时	12台/ 16.015×10^6 仟卡/小时, $P=1.1$ 公斤/厘米 ² , $T=802 \sim 860^{\circ}\text{C}$
乙烷裂解炉	1(2)台/ 11.05×10^6 仟卡/小时, $P=1.07$ 公斤/厘米 ² , 现一台, 将扩至2台, $T=814 \sim 870^{\circ}\text{C}$		3台/ 8.6×10^6 仟卡/小时, $P=1.1$ 公斤/厘米 ² , $T=870^{\circ}\text{C}$ (最高)	2台/ 12.95×10^6 仟卡/小时, $P=1.1$ 公斤/厘米 ² , $T=821 \sim 860^{\circ}\text{C}$
石脑油裂解炉废热锅炉	20(28)台/ 2.38×10^6 仟卡/小时, 出口温度 326°C , 现20台, 将扩至28台	26台/ 2.727×10^6 仟卡/小时, 出口温度最高 450°C 最低 380°C	26台/ 2.27×10^6 仟卡/小时, 出口温度: 最高 500°C 最低 375°C	24台/ 2.56×10^6 仟卡/小时, 出口温度 326°C
乙烷裂解炉废热锅炉	2(4)台/ 1.77×10^6 仟卡/小时, 出口温度 326°C , 现2台将扩至4台		6台/ 1.5×10^6 仟卡/小时, 出口温度: 最高 500°C	4台/ 2.288×10^6 仟卡/小时, 出口温度 326°C

的范围内选取, 因为在相应的蒸汽饱和温度下, 锅炉管结焦最少, 故上述各厂的废热锅炉, 其蒸汽压力为123公斤/厘米²。

对于石油工业, 回收流动床催化裂化装置(FCC)催化剂再生烟气中废热废能比较广泛, 回收的方式各有异同。离开再生器的释放烟气, 其温度范围在 $260 \sim 621^{\circ}\text{C}$ ($500 \sim 1100^{\circ}\text{F}$) 之间, 通常含有4~9%的CO气, 具有的总热量约为355仟卡/米³ (40英热单位/呎³), 其中有一半以上是显热。直到1953年才认为这些贫气的化学热有回收的可能性, 用燃烧CO贫气的特殊锅炉(切向燃烧)来副产蒸汽^[34]。至1963年, 在美国的石油公司有五台CO气体废热回收装置, 第一台于1957年开始运转。这些废热锅炉经过实践证明, 都可节约燃料, 其它预计的经济指标也都可实现。现在由于生产了比定额更多的蒸汽, 大部份装置提供了比设计的经济指标还要高的利润^[32], 有人还对美国“Whiting”石油公司的装置作

表1-2 美国石油公司所属炼厂中某些CO废热锅炉的操作数据

操作数据 \ 厂名或所在地	怀亭炼厂	休格河	盐湖城	得克萨斯城
蒸汽 吨/小时	159	113	62.5	93
再生器废气 吨/小时	268	191	113	135
蒸汽温度 $^{\circ}\text{C}$	332.2	357	357	371
蒸汽压力 公斤/厘米 ² (表压)	33.1	36.7	33.1	29
给水温度 $^{\circ}\text{C}$	113	115.5	110	110
锅炉入口的再生器废气温度 $^{\circ}\text{C}$	565.5	537.7	271	607
锅炉出口的再生废气温度 $^{\circ}\text{C}$	229.3	232.2	232.2	204.4

了经济核算,证明是合算的^[33]。表1-2是某些美国石油公司对于催化裂化触媒再生CO释放气废热回收锅炉的典型数据。

对于石油催化裂化催化剂再生释放气还有一定的压力(约1.08公斤/厘米²表压),文献^[31]评比论述了用高温气体膨胀机(回收压力能)和废热锅炉(回收热能产生蒸汽用于透平)的三种不同组合方式以回收能量的经济情况。

在化学工业中,废热锅炉的应用也在不断发展。如化肥工业,自六十年代以来,大型合成氨厂相继出现,日产600吨、1000吨,以至1500吨氨的工厂都已大量投产,而日产3000吨氨的装置也将设计出来^[2]。这大型合成氨厂的特点之一就是废热利用比较完善。据文献^[36]报导:产氨600吨/日的厂,其一、二段转化炉都装有废热锅炉,变换炉有外部激冷废热锅炉,甲烷化器和合成塔后也有废热锅炉,这些锅炉的蒸汽压力均为35公斤/厘米²(500磅/吋²)表压。据文献^[37]:产氨1000吨/日的厂,废热锅炉的安排也是如此,而蒸汽压力则达105公斤/厘米²,过热到440~460℃。根据文献^[5]:1500吨/日的厂,除甲烷化器的热未回收外,其余均与1000吨/日的厂差不多。对于氨合成塔外置式废热锅炉的流程布置,文献^[4,29,38]作了评述。

此外,如硫酸工业,在以硫铁矿作原料的沸腾层焙烧炉或以硫磺作原料的燃硫炉后都安装有废热锅炉,在SO₂转化炉的各触媒段之间也安装废热锅炉或蒸汽过热器^[39]。在硝酸制造厂,于铂触媒网氨氧化炉之后安装废热锅炉或装设燃气轮机与废热锅炉的联合装置,以回收能量^[1,8]。

在冶金工业中,废热更是非常丰富,因而废热锅炉受到普遍应用。在金属冶炼过程中,如铜精矿反射炉、铜精矿自熔炉、冰铜炼制转炉、锌精矿焙烧炉、硫铁矿焙烧炉、炼钢平炉或转炉等,都有大量的高温废气产生,废气温度:反射炉及自熔炉达1250~1300℃,炼铜转炉达1100~1200℃,焙烧炉达900~950℃,煤气平炉达500~550℃,重油平炉达550~600℃,纯氧顶吹转炉达1700~1800℃,因此都装有废热锅炉。这些锅炉的蒸汽压力目前多是中压(40~48公斤/厘米²),个别是低压(9~18公斤/厘米²),蒸汽过热到250~425℃不等^[6,11,34,35,40]。对氧气底吹炉子在文献^[34]中介绍了燃烧废气中CO、用吸热罩产生蒸汽的闭式循环法和开式循环法。高炉冶炼生铁时,高炉煤气可以在动力锅炉中燃烧,因为其中含有约13%的CO和1~2%的H₂,热值约为750~1000仟卡/标准米³,空气切向吹入可使这种贫气获得良好燃烧。也有用高炉煤气作燃气轮机的燃料以回收热能^[34,41]。表1-3是日本三菱工业株式会社炼铜废热锅炉的指标^[6]。

在动力工业中,废热锅炉用得最多的是燃气轮机。燃气轮机早在三十年代末期,就开始用于炼油厂。但是由于燃气轮机的效率很低,简单循环仅20~25%,故未获得广泛采用。最近以来,由于采用蒸汽—燃气联合循环以提高效率,总效率可达80%或更高^[32,41]。并且由于燃气轮机具有单机容量大、重量轻、体积小、不需要冷却水、润滑油耗量少、操作简便等优点,因此在燃料方便(或有废燃料)既需动力又需工艺蒸汽的场合(如石油、化工、冶金),以及需要发动机功率大、重量轻的交通运输工具(如海船、军舰、机车、列车电站、快速电站)等,燃气轮机都获得了广泛应用,因而废热锅炉也随着应用到了这些企业范围。在石油(或天然气)工业中,燃气轮机广泛用于:

- A、拖动石油(或天然气)输送管线的增压设备——增压油泵和天然气离心压缩机;
- B、拖动油井高压注水泵或高压压气机;

表1-3

日本三菱炼铜废热锅炉主要指标

炉 型	别 式	焙烧炉锅炉 三菱水管式 强制循环	反射炉锅炉 三菱水管式 自然强制组合循环	转 炉 锅 炉 三菱水管式 强制循环
数	量 (台)	2	2	3
蒸汽压力	最高使用, 公斤/厘米 ² (表压)	48	48	44
	常用, 公斤/厘米 ² (表压)	40	40	40
蒸汽温度,	℃	250	420	250
给水温度,	℃	120	120	120
锅炉进口气体量	最大, 标准米 ³ /分	—	1030	920
	常用, 标准米 ³ /分	530	515	820
锅炉进口气体温度	最高, ℃	750	—	—
	平均, ℃	650	1250	800
蒸发量	最大负荷, 公斤/小时,	7580	33000	16000
	常用负荷, 公斤/小时,	6650	17300	14100
通 风 形 式		诱导通风	自然通风	诱导通风

C、在炼油厂（或乙烯厂）中，燃烧流程产生的气体燃料（如催化裂化装置中催化剂的再生气）作为“流程”燃气轮机以拖动压缩机压缩空气或裂解气^[41]，

D、在其它石油化工厂，也主要是作为“流程”燃气轮机使用。例如日产600吨/日氨的合成氨厂，用两台燃气轮机（以天然气作燃料）和一台蒸汽透平成功地操作了两年仅停车八小时^[42]。又如在“B P Chemical Hull Works”工厂，燃气轮机被用来拖动两台空气压缩机，每台空压机的容量是59000公斤/小时（130000磅/小时）、52.8公斤/厘米²表压（750磅/吋²）的空气。透平是瑞士苏尔寿公司制造的，烧流程的燃料（轻质烃馏份）而比较节省。燃气透平所排废气经过废热锅炉产生17.8公斤/厘米²表压（250磅/吋²）的饱和蒸汽。该工厂系以烃作原料用液相氧化法生产醋酸和其它羧酸类^[15]。

燃气轮机也用于制备稀硝酸的某些流程。

除了上述而外，在城市煤气制造、玻璃、陶瓷、水泥、耐火材料、造纸……等工业中，都有废热可供利用^[1、3]，因而有的也装设废热锅炉。

二、典型流程的经济意义

下面选列几个石油、化工、冶金和动力工业中废热锅炉的典型流程和数据，借以说明废热回收的经济意义。

1.合成氨工业

文献〔2、5、37、43〕中都有大型合成氨厂的流程图，现选其一〔2〕加以说明，流程如图1-1和图1-2所示。

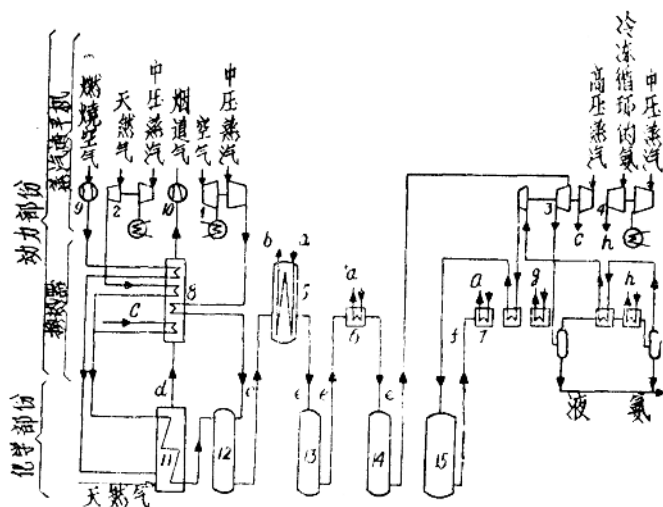


图1-1 以天然气作原料的合成氨厂流程

1.蒸汽透平驱动的空气压缩机；2.蒸汽透平驱动的天然气压缩机；3.蒸汽透平驱动的合成用气压缩机；4.蒸汽透平驱动的冷冻循环压缩机；5.单管式蒸汽发生器；6.CO变换炉后的变换气冷却器；7.合成气冷却器；8.热回收系统；9.鼓风机；10.抽风机；11.一段转化炉；12.二段转化炉；13.CO变换炉；14.气体精制系统；15.合成工段。

a.锅炉给水；b.高压蒸汽；c.中压蒸汽；d.烟道气；e.制备阶段的工艺气；f.合成的循环气；g.冷却水；h.冷冻循环的氨。

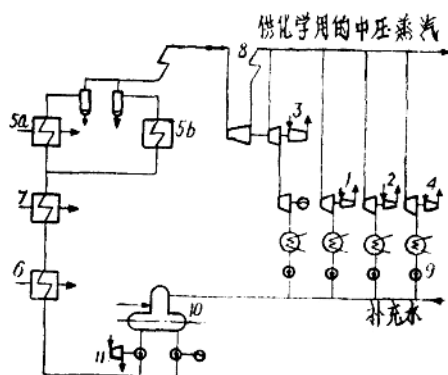


图1-2 合成氨厂的蒸汽循环流程

1.蒸汽透平驱动的空气压缩机；
2.蒸汽透平驱动的天然气压缩机；
3.蒸汽透平驱动的合成用气压缩机；
4.蒸汽透平驱动的冷冻压缩机；
5a.化学反应气加热的单管式蒸汽发生器；
5b.烧燃料的单管式蒸汽发生器；
6.CO变换炉炉气冷却器；
7.合成气冷却器；
8.利用一段转化炉烟道气加热的再热器；
9.冷凝液泵；
10.脱氧器（带给水槽）；
11.给水泵。

此流程为回收废热生产高压蒸汽驱动蒸汽透平拖动高速离心压缩机以及发电机的简化典型流程。

生产氨1000吨/日的厂，所需拖动下列压缩机的动力为：

(1)	空气压缩机	约 6 兆瓦
(2)	天然气压缩机	约 2 兆瓦
(3)	合成气压缩机	约 18 兆瓦
(4)	冷冻循环压缩机	约 4 兆瓦

共约 30 兆瓦

此外，还常常有一些附加的发电机需要拖动，那就是附近工厂或联合企业所需的小型供电发电机等。这些驱动所需的能量，可以大量地从合成氨厂的废热取得，1000吨/日的合成氨厂可以给出的废热大致如下（设备仍如图1-1、1-2所示）：

(5)	冷却二段转化炉的转化气 (H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、和 N_2)， 在约30.6公斤/厘米 ² (30巴)，从 950℃冷却到350℃	约 60 兆瓦
(6)	冷却CO变换炉后的气体以 及各个精制过程后的上列 气体，在约30.6公斤/厘米 ² 从400℃冷却到室温并冷凝 气体中所含水蒸汽	约 40 兆瓦
(7)	氨合成热的回收，即冷却 合成炉后的合成气，在约 265公斤/厘米 ² (260巴)、 从380℃冷却到240℃	约 25 兆瓦
(8)	冷却从一段转化炉排出的 烟道气，在常压下，从950℃ 冷却到合乎经济效果的废 气温度	约 30 兆瓦

共约 155 兆瓦

这些废热的适当利用对于合成氨厂的经济核算起着决定性的作用。这首先要求要有一个现代化的合适的蒸汽系统，即采用最适宜的蒸汽条件和给水条件。这个蒸汽系统必须供应流程所需的工艺用汽（生产1000吨/日的合成氨厂约为100吨/小时，蒸汽压力约为30.6公斤/厘米²，要求尽量过热），并同时要求合成氨厂在能量平衡上做到自给自足。

产量为1000吨/日的合成氨厂，约需200吨/小时的高压蒸汽（102公斤/厘米²、540℃），其中大部分由废热锅炉产生，其余部份由辅助锅炉产生。此蒸汽在拖动合成气压缩机的蒸汽透平中膨胀至中压（30.6公斤/厘米²），然后，蒸汽的一半进行再热并送入一段转化炉作为工艺汽，而另一半则在凝汽式蒸汽透平中膨胀（拖动功率较小的压缩机等）〔2〕。

由上述数据可见：废热功率（155兆瓦）约为压缩机总消耗功率（30兆瓦）的五倍，如果不负担工艺用汽，在能量平衡上是可以自给有余的。155兆瓦废热相当于 133×10^8 仟卡/小时，也相当于15,900标准米³/小时天然气（天然气热值按8339仟卡/标准米³计算）或19吨/小时标准煤（标准煤热值=7000仟卡/公斤）。以年计算，则每年的废热量约相当 115×10^6 标准米³天然气，或 137×10^3 吨标准煤，数量是巨大的。这样巨大的废热，如果利用适当，高效率地产生蒸汽和动力供全厂使用，则整个合成氨厂的燃料消耗和动力消耗将大大下降，氨的生产费用亦将大为降低。下面举几个以天然气作原料的实际合成氨厂为例，其天然气和电力的消耗指标列如表1-4，并进行对比如表1-5所示。

表1-4 几个合成氨厂的消耗指标

厂 别	产 量 吨 NH ₃ /日	废 热 回 收 情 况	消 耗 指 标	
			天然气: 标准米 ³ /吨NH ₃	电力: 度/吨NH ₃
甲厂	400(410)	基本上未回收	1250	1500*
乙厂	300(280)	用低压锅炉回收，仅作工艺蒸汽用	1039	895
丙厂	1000	用高压锅炉回收，既作动力，又作工艺蒸汽	870	19.1

注：*甲厂电力由电厂供给，乙厂电力由本厂烧天然气发电供给。

表1-5 消耗指标对比

厂 别	产 量 吨NH ₃ 日	天然气总 耗量 标准米 ³ 吨NH ₃	天然气消 耗量比 %	每吨NH ₃ 的生产费用 %	比丙厂多耗的天然气		折合NH ₃ 损失 吨/年	相当的粮食损失	
					标准米 ³ 吨NH ₃	标准米 ³ 年(300天)		吨/年	亿斤/年
甲厂	400(410)	2000*	227	320	1122*	139×10^6	156×10^3	1930×10^3	38.6
乙厂	300(280)	1486	170	162	604.8	51×10^6	58×10^3	720×10^3	14.4
丙厂	1000	878.2	100	100					

注：* 甲厂自己未用天然气发电，为了便于比较，将电耗都换算成天然气量。

** 每度电消耗天然气0.5标准米³。

*** 粮食折算，按每斤氮素增产粮食15斤计算。

由表1-5可见废热的利用如何，对合成氨原燃料和动力的消耗指标以及生产成本影响非常之大。如果废热利用不好，象甲、乙厂那样每年就会多耗天然气各为 139×10^6 和 51×10^6 标准米³，两厂共计每年损失天然气约 190×10^6 标准米³，即损失化肥液氨（按丙厂消耗指标计算）约213,000吨，亦相当于损失粮食约53亿斤，约占我国1972年粮食总产量的1%多，可见废热回收价值多么巨大！

2. 乙烯工业

从石脑油/乙烷裂解制乙烯的流程，各厂大同小异，废热锅炉型式也不太相同，但都有废热锅炉。例如在日本生产30万吨/年乙烯装置的废热锅炉就有四种型式^[24]。现以日本丸善厂的流程为例，说明废热锅炉在乙烯工业中的重要意义。

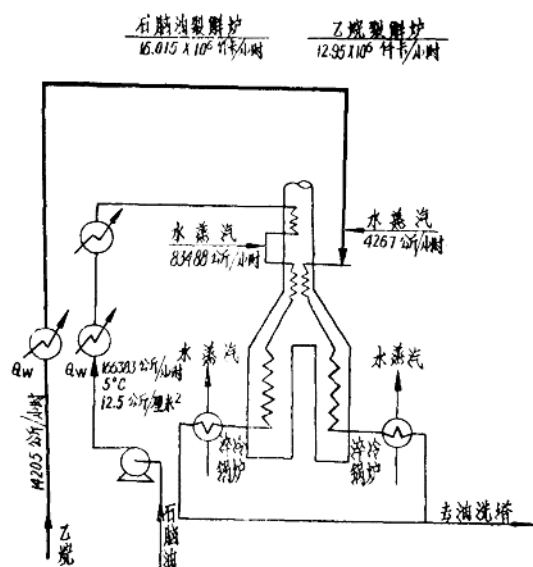


图 1-3 日本丸善厂石脑油/乙烷裂解制乙烯的裂解炉及急冷锅炉流程图

图 1-3 示裂解炉和急冷锅炉（即废热锅炉）的配置，其蒸汽平衡如图 1-4 所示。

从本章表 1-1 可以查得：丸善厂的石脑油裂解炉有废热锅炉 24 台，每台回收热量为 2.56×10^6 仟卡/小时，乙烷裂解炉有废热锅炉 4 台，每台回收热量为 2.288×10^6 仟卡/小时，这 28 台急冷废热锅炉总共回收热量约为 70.6×10^6 仟卡/小时，相当于 10.1 吨/小时标准煤，相当 100 号重油 7.3 吨/小时。与上述产量为 30 万吨/年 NH_3 的合成氨厂比较，约为氨厂废热的 53%。这一数量也是非常大的，因此必须把它用高压动力锅炉回收起来，所产生的蒸汽作为其后压缩裂解气去进行分离的压缩机的动力，如蒸汽平衡图上所示的乙烯压缩机、丙烯压缩机、裂解气压缩机以及发电机等等。

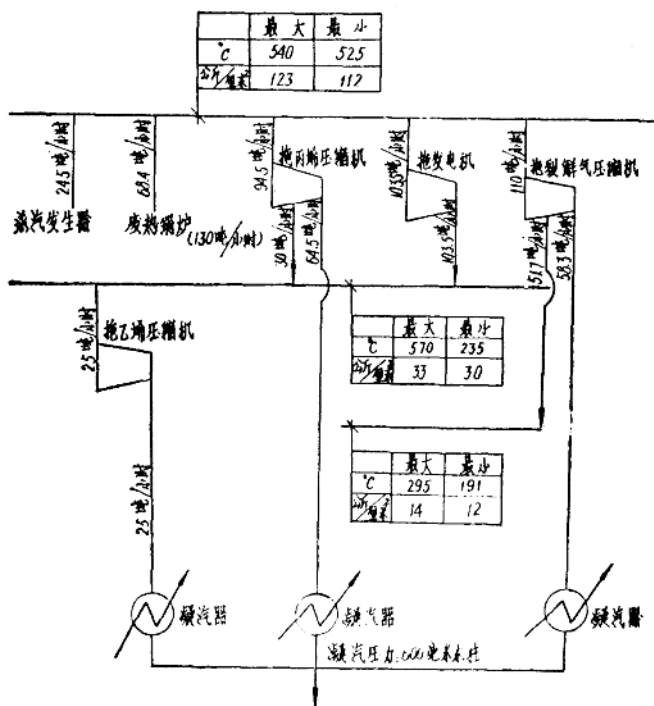


图 1-4 日本丸善厂 30 万吨/年乙烯生产蒸汽平衡图

3. 硝酸生产中的废热锅炉

在硝酸生产中，氨氧化炉的炉气温度很高（约900℃），其热量很值得回收。

由于氨在大气压下氧化比加压氧化效率高，故采取常压氧化加压吸收，利用废热锅炉、蒸汽透平和透平膨胀机联合回收热量和能量，如图1-5所示。

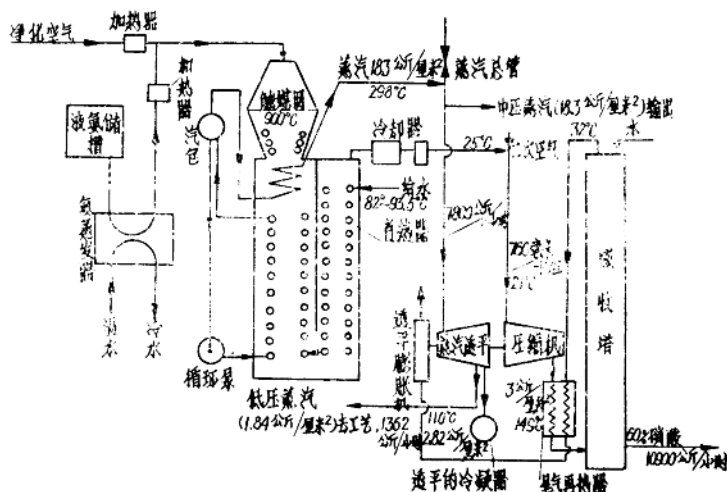


图 1-5 现代化的混合加压硝酸制造厂的热和能量回收

（三台氧化炉的废热锅炉并联一个公用汽包）

氧化炉后的高温氧化氮气体从上向下通过“La Mont”型21公斤/厘米²（300磅/时²）的水管锅炉，然后向上通过给水预热器（省热器）。用冷却水进一步冷却后，气体的温度降低到25℃，加入二次空气之后，由离心式压缩机加压到3公斤/厘米²（42磅/时²）在进入吸收塔之前与从吸收塔出来的尾气进行换热，冷却后进入吸收塔。被加热的尾气在2.82公斤/厘米²（40磅/时²）和110℃（230°F）下进入透平膨胀机。离心压缩机由透平膨胀机和蒸汽透平联合拖动。

废热锅炉足够供给工厂需要的全部蒸汽，在操作合理的情况下，还有少量多余可以送入蒸汽总管。

氧化氮压缩机是六级离心式，设计能力是把25,500米³/小时（15,000呎³/分）的气体从760毫米水柱加压到4绝对大气压。

单级气体透平膨胀机与压缩机轴直接相联。膨胀透平的设计能力为把21,800米³/小时（12,900呎³/分）的尾气在104℃（220°F）从4绝对大气压膨胀到1绝对大气压，输出710仟瓦（950马力）轴功率，它可供给压缩机所需能量的30%以上。

蒸汽透平的最大输出功率为1400仟瓦（2000马力）〔1〕。

由上可见这一流程回收的废热产生约2100仟瓦动力，在老式稀硝酸厂（产量10900公斤/小时），还得花2100仟瓦电力来拖动离心压缩机，每年将耗费 16.8×10^6 度电。

4. 硫酸厂的废热锅炉

硫磺制酸生产流程的废热利用如图1-6，以沸腾焙烧炉烧硫铁矿（或锌精矿等）的废热