

化工设备设计全书

废 热 锅 炉

《化工设备设计全书》编辑委员会

古大田 方子风 等编

化学工业出版社

工业装备与自动化出版中心

北 京

《化工设备设计全书》编辑委员会

主任委员 袁 纽 中国石油和化工勘察设计协会

副主任委员 华 峰 中国石化集团上海医药工业设计院

洪德晓 全国化工设备设计技术中心站

委 员 叶文邦 钱小燕 黄正林 汪 扬 金国森

应道宴 魏兆灿 秦叔经 虞 军 曹文辉

前 言

《化工设备设计全书》第一版由原化学工业部化工设备设计技术中心站组织全国高校、科研、设计、制造近百家单位参与编写。

《化工设备设计全书》以结构设计、强度计算为主，从基础理论、设计方法、结构分析、标准规范、计算实例等方面进行了系统的阐述，并对相应的化工原理作简介。“全书”在重视结构设计、强度计算的同时，结合化工过程的要求去研究改进设备的设计，提高设备的效率，降低设备的成本，以求实现化工单元操作的最佳化，并力求反映当前国内及国际的先进技术。“全书”自20世纪80年代出版发行后，因其内容的实用性，得到化工、石化、医药、轻工等相关行业的设备专业人员欢迎。

近十余年来，我国化工装置的设计，化工设备的研究、开发、制造和标准化工作有了较大的发展，建造设备用的结构材料也有了新的进展，有必要对“全书”的内容加以更新、补充，以适应现代工程建设要求，满足广大工程技术人员，特别是年青一代工程技术人员的需要。中国石油和化工勘察设计协会、中国石化集团上海医药工业设计院、全国化工设备设计技术中心站组成了《化工设备设计全书》编辑委员会，负责“全书”的修订工作。“全书”的修订原则是“推陈出新”，以符合现代工程建设要求。

《化工设备设计全书》计划出版15种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书为《废热锅炉》，系统地介绍了废热锅炉的结构设计，热力计算，阻力及水循环计算、特殊部件的强度计算，材料、制造、安装及检验，用水和运行维护，并列举了生产应用与制造的实例。原编写者有：古大田、张洪波、王荣贵、丁言礼、孙钜源、胡坚、黎廷新、方子风、陈山辉、程福九、陆忠逵等。现由古大田（第一～第三章），方子风（其余各章）负责主编。

《化工设备设计全书》编辑委员会

2002年1月

内 容 提 要

《化工设备设计全书》计划出版 15 种, 计有:《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书为《废热锅炉》, 系统地介绍废热锅炉的结构设计, 热力计算, 阻力及水循环计算、特殊部件的强度计算, 材料、制造、安装及检验, 用水和运行维护, 并列举了生产应用与制造的实例。

本书可供从事废热锅炉的设计、制造与使用的工程技术人员, 也可供高等院校的有关专业的师生参考。

目 录

第一章 概述	1
第一节 废热锅炉及其应用情况.....	1
一、合成氨工业.....	2
二、乙烯工业.....	3
三、硫酸工业.....	3
四、硝酸工业.....	5
五、其他化学工业.....	6
第二节 废热锅炉的分类和系统及附件.....	6
一、废热锅炉的分类.....	6
二、废热锅炉的系统及附件.....	8
第三节 废热锅炉的发展动向.....	8
一、大型化.....	8
二、高参数（高温、高压）.....	8
三、自动化.....	8
四、定型化.....	8
五、高、中、低温余热同时开发利用.....	8
六、强化传热技术引入废热锅炉.....	9
七、出现外加热载体废热锅炉.....	9
八、垃圾焚烧处理用废热锅炉.....	9
参考文献.....	9
第二章 废热锅炉的选型及结构设计	10
第一节 废热锅炉的选型.....	10
一、根据工艺气体的条件确定.....	10
二、按照材料、制造、安装和检修的条件确定.....	10
第二节 结构设计.....	11
一、废热锅炉的结构类型及特点.....	11
二、主要零部件的结构设计.....	59
第三节 辅助设备的设计.....	85
一、气包的设计.....	85
二、上、下联箱的设计.....	106
三、清管器的设计.....	107
参考文献.....	111
第三章 热力计算	112
本章符号表.....	112
第一节 热力计算的目的、步骤和常见物料的物理常数及其计算.....	113

一、热力计算的目的和步骤	113
二、物理数据计算	114
三、石油化工常见物料的物理常数基础数据	125
第二节 传热计算	138
一、稳定传热	139
二、非稳定热传导	174
三、热量衡算与产气能力计算	180
四、传热面积计算	190
五、废热锅炉的壁温计算	194
参考文献	210
第四章 废热锅炉的气侧阻力及水循环计算	212
第一节 气侧阻力计算	212
一、气侧阻力的计算步骤及方法	212
二、典型废热锅炉结构的气侧阻力计算方法	218
第二节 水侧自然循环的计算及设计	223
一、概述	223
二、循环回路中各项参数的确定及计算	226
三、循环回路系统的阻力计算	235
四、自然循环的工作特性曲线	251
五、自然循环的故障及循环可靠性的校验	251
六、自然循环回路的设计	256
七、几种典型废热锅炉的水循环计算方法	259
第三节 强制水循环计算	267
一、强制循环的计算步骤	267
二、强制循环回路的水力特性计算	268
三、强制循环可靠性的校核	269
第四节 直流无循环的水力计算	270
一、直流无循环系统的流动阻力计算及水动力特性曲线	270
二、蒸发受热管内的热偏差、热力不均匀性及水力不均匀性的计算	270
参考文献	272
第五章 元件的强度计算	273
第一节 圆筒形元件	275
一、圆筒在内压作用下的计算	275
二、圆筒的边界问题	277
三、圆筒的温差应力	279
四、圆筒的低循环疲劳计算	280
五、圆筒在外压作用下的计算	282
第二节 封头	282
第三节 开孔的补强	283
一、筒体大开孔补强	283

二、孔桥的管接头补强·····	283
第四节 法兰连接·····	284
一、法兰连接的设计计算·····	284
二、法兰连接在高温下出现的问题与可采取的措施·····	286
第五节 U形波纹膨胀节·····	288
一、概述·····	288
二、几种计算方法的分析比较·····	290
三、U形膨胀节的计算·····	296
四、许用应力·····	298
五、单层与多层膨胀节的性能比较·····	300
六、参数的分析与适宜尺寸的选择·····	301
第六节 管板·····	302
一、平管板·····	302
二、拉撑管板·····	304
三、拉杆薄管板·····	308
四、半螺旋管椭球管板·····	310
第七节 扁平集流管·····	312
一、西贝尔设计公式与存在的问题·····	312
二、集流管应力的计算·····	313
三、集流管壁厚的设计方法和公式·····	314
四、集流管拉筋和筋板强度·····	315
第八节 焊制三通、叉形管·····	315
一、焊制三通·····	315
二、等径叉形管·····	322
参考文献·····	322
第六章 材料 ·····	324
第一节 概述·····	324
一、废热锅炉的工况特点·····	324
二、合理选材和对金属材料的要求·····	326
第二节 波形膨胀节的选材·····	327
一、膨胀节的材料和防腐·····	327
二、其他零件的材料·····	327
第三节 废热锅炉用金属材料的适用范围和物理性能·····	328
第四节 废热锅炉用的耐火、绝热材料·····	330
一、国内废热锅炉防护用耐火、绝热材料情况·····	331
二、国外废热锅炉防护用耐火、绝热材料情况·····	334
参考文献·····	338
第七章 制造、检验和安装 ·····	339
第一节 几种典型零部件的制造与检验·····	339
第二节 安装和检验·····	351

一、概述.....	351
二、安装前的准备工作.....	351
三、废热锅炉系统的安装与检验.....	368
参考文献.....	369
第八章 废热锅炉用水	370
第一节 水质要求.....	370
一、水质指标.....	370
二、水质标准.....	371
第二节 给水和炉水的处理.....	380
一、炉外处理.....	380
二、炉内处理.....	380
三、给水和炉水的补充处理.....	380
第三节 排污.....	381
一、定期排污.....	382
二、连续排污.....	382
参考文献.....	382
第九章 运行及维护	384
第一节 概述.....	384
第二节 准备工作.....	384
第三节 开车运行.....	385
第四节 停炉及维护.....	386
一、正常停炉.....	386
二、事故停炉.....	386
三、停炉后的维护.....	387
第五节 运行事故的处理.....	387
一、工艺气体出废热锅炉的温度超高或偏低.....	387
二、水位失常.....	388
三、超压.....	389
四、气水共腾.....	389
五、水循环不正常.....	389
六、水质不良.....	389
七、气道堵塞或结焦.....	389

第一章 概 述

第一节 废热锅炉及其 应用情况

废热锅炉系指那些利用工业过程中的余热以产生蒸气的锅炉，其主要设备为锅炉本体和气包，辅助设备有给水预热器、过热器等。在过去，工业过程中许多余热是未加以充分利用即行浪费掉的，例如烟道气（约 200~300℃）、高炉炉气（约 1500℃）、需要冷却的化学反应工艺气（300~1000℃）……的余热即是如此。随着工业的发展和能源供求的紧张，工程技术人员对于这些过去废弃不用的余热加以重视，利用它来产生压力蒸气，以此作为供热、供气、供电和动力的辅助能源，借以提高热能的总利用率，降低燃料消耗指标，降低电耗，以获取经济效益。所以人们都把这称为“废热回收”。把用这种热量产生蒸气的设备称为“废热锅炉”。也有人把这类锅炉称作“余热锅炉”，还有人从设备在工艺流程中的作用出发把该设备称为“急冷器”或“激冷器”。

废热锅炉利用的余热，不仅是高温气体的显热，而且还利用某些废气中所含少量可燃物质（如 CO 、 H_2 、 CH_4 、 H_2S 、 C 、 C_6H_6 、己内酰胺……）的化学热能。从 20 世纪 60 年代末期以来，利用低沸点介质研究利用低温（200℃ 以下）气体的显热以产生动力蒸气的“低温废热锅炉”也有比较大的进展，有的已用到工业生产之中。

随着工业的发展和工厂设备的大型化，各工厂对于动力和电力的需要量增大，而同时工厂的余热和废热量也大。为了利用余热自产电力和动力以减少生产费用，这类大型工厂的废热锅炉都趋向于动力废热锅炉，因而需要提高锅炉参数（蒸气的压力和过热温度）以获取蒸气循环较高的热功率效率，多产电力和动力。一般，对于高温余热的利用，趋向于把过去的低压锅炉尽可能提高压力，改成为高压过热蒸气的动力锅炉，对于温度较低的余热利用，也尽可能设计成低压供气锅炉，或者作为预热高压动力废热锅炉的给水之用。高压废热锅炉的蒸气工作压力一般在 10MPa 以上，通常选取 10.55MPa 较多，或者选取接近于这一压力的工作压力。由于水的沸腾临界热负荷在这一工作压力数值最大，因此能够承受工艺气操作温度的较大波动，也不易使工作热负荷超过临界值，以致形成膜状沸腾而烧坏炉管，一般工艺气温度波动较大，废热锅炉又多以工艺气为热源，所以水的这一

临界热负荷对废热锅炉很有意义。此外，锅炉选在这一压力工作，其工作热负荷数值也可选得大一些，因而在同样传热量的情况下，换热面积也可设计得小一些，可节省一些制造费用。

有的工艺气的露点较高，为了使锅炉管壁的温度不致降到工艺气的露点以下，以避免管壁产生焦油结焦或者遭受腐蚀，所以要提高锅炉的蒸气压力以提高管壁温度。例如乙烯急冷锅炉，则视原料油的种类（石脑油、轻柴油），其工作压力一般在 9.4~12.7MPa 表压之内选取。我国引进的 30 万吨/年乙烯工厂的废热锅炉，其蒸气工作压力即为 12.4MPa 表压。再如硫铁矿沸腾焙烧炉炉气冷却器——废热锅炉，过去曾经采取 $(7\sim 12)\times 10^5\text{Pa}$ 表压工作的低压蒸气锅炉，以致炉气出口段的炉管受到严重腐蚀，因为在这种工作压力范围内的锅炉水温为 169.6~190.7℃，大大低于该炉气中水分与 SO_3 形成的硫酸的露点温度（270~330℃），于是容易使炉气的水分与 SO_3 在管子出口端管壁近旁达到露点而凝结在管壁上，产生腐蚀作用。因此，近代的硫铁矿沸腾焙烧炉的炉气冷却废热锅炉，其工作压力一般选取 $40\times 10^5\text{Pa}$ 表压，此时的饱和水温度为 250.5℃，在国外有选取 $65\times 10^5\text{Pa}$ 表压的，此时的饱和水温度为 279.4℃，这样，不但可以安全地避免炉管遭受酸雾的腐蚀，而且可以提高蒸气循环的热功效率，多发电。很明显，废热锅炉选取了高的蒸气工作压力，将导致工艺气的冷却不够，使得废热锅炉工艺气的出口温度升高，在某些场合就达不到工艺流程中对废热锅炉的反应设备所要求的较低化学反应温度，在这种情况下，就不能随意提高废热锅炉的蒸气压力了。如果在选取了较低蒸气压力的废热锅炉后会造成锅炉管出口段腐蚀的时候，则要求设计者打破陈规，独创地来解决这一问题。譬如把锅炉设计成两台不同压力的，而把两台锅炉的工艺气串联起来，并选择耐腐蚀材料来制造低压易遭腐蚀的那台废热锅炉。

在条件许可的情况下，为了提高热功效率，动力废热锅炉的蒸气工作压力，个别的达 $162\times 10^5\text{Pa}$ 表压，更高工作压力则少见。至于蒸气的过热温度，一般均在 400℃ 以上，有的高达 580℃，但 440~560℃ 较多。

把废热锅炉自产的高压、高温过热蒸气用来驱动大功率背压式气轮机，以直接拖动本厂的大型机器，例如大型压缩机、大型泵和风机等。从背压式气轮机抽出的中压蒸气，一部分用在凝气式中压气轮发电机

发电, 供本厂的各种中、小型机器和照明之用。另一部分中压蒸气可以供中压工艺蒸气用, 或者供中压气轮机直接拖动中型机器, 而将其低压乏气作为低压工艺蒸气和采暖等用。这样一来, 既节约了原料蒸气, 又节省了燃料, 并自给了动力和电力, 使产品成本大为降低。因此, 废热锅炉在各行各业之中均获得了广泛应用。尤其是 20 世纪 70 年代以来, 由于世界的能源逐渐短缺, 而能源需要量则日益增多, 有些工业国家出现了能源危机, 因此节约能源的呼声甚高, 节能措施和技术的研究者也日益增多。废热锅炉是节能工作中回收热能用得最普遍、最多的一种技术装备, 因而对废热锅炉的研究与推广使用, 将对能源节约起着极为重要的作用。

还必须提到的是, 由于余热的数量和温度高低, 各种工厂或车间不会相同, 因而这些废热锅炉的容量也有大有小, 工作压力也有高有低, 要把这些容量大小不同, 蒸气压力高低不等的水蒸气作为动力之用, 就需要有一系列的气轮机与之配套才能发挥出废热锅炉动力应用的经济效益。

下面重点对化工或石油化工中某些常见工业废热回收情况及其经济效益作扼要介绍。

一、合成氨工业

在 20 世纪 60 年代后期, 大型合成氨厂相继出现, 日产 600t、1000t、以至 1500t 合成氨的工厂都已大量投产, 而日产 3000t 合成氨的装置也将设计出来^[4]。这些大型合成氨厂的特点之一是废热利用比较完善。据文献 [5] 报道, 日产合成氨 600t 的厂, 其一、二段转化炉后都装设有废热锅炉, 变换炉有外部激冷废热锅炉, 甲烷化器和氨合成塔底也各有一废热锅炉。这些锅炉的蒸气压力均为 $35 \times 10^5 \text{Pa}$ 表压, 这是 20 世纪 60 年代初期的水平。据文献 [4]、[6]、[8] 报道: 日产合成氨 1000t 的厂, 其流程中的废热锅炉安排, 与上述流程大同小异, 而蒸气压力则均为 $105.5 \times 10^5 \text{Pa}$ 表压, 蒸气过热到 $440 \sim 460^\circ\text{C}$, 作为拖动各种压缩机等的动力之用。在流程安排上, 有的

工厂在甲烷化器和氨合成塔后设置的是给水预热器而非废热锅炉。根据文献 [6]、[8] 报道, 日产 1500t 的合成氨厂, 其流程安排除甲烷化器的热未回收外, 其余均与日产 1000t 的工厂差不多。

在我国除了 20 世纪 70 年代引进的以及自己设计的 30 万吨/年合成氨厂有如上述的高压动力废热锅炉而外, 其余 10t/a、5000t/a 以及 5 万吨/年等中、小型合成氨厂一般仅在煤造气、或天然气的蒸气转化工段设置有废热锅炉, 而且这类废热锅炉的蒸气压力都为中、低压, 并多是用作原料蒸气, 因此这类老厂, 虽然或多或少地节约了产生原料蒸气所消耗的热量和燃料, 但是对于合成氨厂耗电巨大的压缩机并没有减少外供电力消耗量, 所以这类工厂的电耗指标仍然很高, 以致产品成本昂贵。有的中型合成氨厂在氨合成塔设计安装了前置式废热锅炉。所谓前置式废热锅炉就是把触媒筐反应后的热气体 (约 $470 \sim 520^\circ\text{C}$) 在进入热交换器冷却之前通过废热锅炉以利用其余热产生中压蒸气, 该锅炉的压力为 2.5MPa, 以后准备发展到 4MPa, 由热衡算及试生产结果, 产气量为 0.8t 蒸气/t 氨, 按此计算, 产氨 1 万吨/年的合成氨厂, 每年可回收 8000t 蒸气, 能节省 1000t 原煤 (热值 20934kJ/kg)。

对于 30 万吨/年大型合成氨厂回收废热的经济效益情况如下。

① 我国 20 世纪 70 年代中期建设的 30 万吨/年合成氨厂废热锅炉、给水预热器及过热管等回收的热量, 如表 1-1 所示。

由表 1-1 可见该厂回收的余热热量 $4.73 \times 10^8 \text{kJ/h}$, 这一数量相当于标准煤 (热值 = 29307.6kJ/kg) 16131kg/h , 每年 (按 300 天计算) 约 116143t。如果以之折合天然气, 则每年大约可以节约天然气 (热值 $\approx 34913.73 \text{kJ/Nm}^3$) $97.5 \times 10^6 \text{Nm}^3$, 即约 $1 \times 10^8 \text{m}^3$, 这是多么巨大的一个数量。由于这些废热锅炉的高压蒸气大部分用作拖动各种压缩机的动力, 所以该厂的外供电耗每吨液氨约 $19 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

表 1-1 30 万吨/年合成氨厂热回收换热器一览表

换热器名称	换热面积 m^2	换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	平均温差 ΔT_m $^\circ\text{C}$	换热量(回收热量) kJ/h	工艺气
(二台)第一废热锅炉	341.87	354.72	348.5	152.11×10^6	二段转化气
第二废热锅炉	232.25	393.91	97.4	32.07×10^6	二段转化气
第三废热锅炉	249.44	630	50.4	28.51×10^6	高温变换气
给水预热器	411.55	598.76	33.7	29.89×10^6	甲烷化气
给水预热器	404.12	1223.06	48.95	87.09×10^6	合成塔气
过热管	—	—	—	143.1×10^6	一段转化炉烟道气
				$(128.37 \times 10^6)^\text{①}$	

① 本数据由流程图的废热锅炉总产气量及过热温升的焓值计算而来, 括号内的数据为过热到低限 441°C 的计算值。

注: 本表数据由英制换算而来。

② 在 20 世纪 70 年代末期建设的 30 万吨/年合成氨厂，其余热回收仅废热锅炉和给水预热器所回收的热量就为 $389.79 \times 10^6 \text{ kJ/h}$ （由于蒸气过热管的回收蒸气缺乏数据，未估算在内）相当于标准煤 13.3 t/h ，每年约为 95760 t ，折合天然气 $111640 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，每年可节约天然气 $80.4 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ ，如果加上过热管回收的烟道气余热，则必然更多一些，故该厂的外供电耗是每吨液氨约 $7 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

③ 对合成氨厂的余热估算^[1]国外苏尔寿公司曾对以天然气作原料的 1000 t/d 合成氨流程作过热量衡算，提出可供回收的余热量共约 155 MW 。 155 MW 相当于 $556.84 \times 10^6 \text{ kJ/h}$ 的热量，也相当于 $15900 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 的天然气（天然气热值按 34913.73 kJ/Nm^3 计算），以年计算，则每年的余热量相当于 $115 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 天然气或 $137 \times 10^3 \text{ t}$ 标准煤。

由上可见，现有的大型合成氨厂的废热回收量还未达到最大值。如果把蒸气平衡、热平衡设计得最佳，并适当提高蒸气参数以提高蒸气循环的热效率，则大型合成氨厂的动力和电力可能全部自给，甚至有余。

二、乙烯工业

以石脑油或轻柴油等油品为原料的碳氢化合物与水蒸气一起在裂解炉中加热，在高温作用下裂解成乙烯、丙烯和芳香烃等馏分。为了防止已裂解的气体因二次反应使乙烯、丙烯等的收率降低，因此，就需要在极短时间约 0.05 s 内将裂解气急冷到 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 左右。

使裂解气冷却的方法很多，以往采用比较简单的油淬冷，或水淬冷方法。这两种方法的共同缺点是在急冷处结焦速度增长很快，影响裂解炉深度裂解的可能性，同时又使裂解气稀释，以致增加分离费用。其次，采用油淬冷，因为在裂解炉附近使用大量的冷却用油，就存在着着火成灾的危险性。采用水淬冷，淬冷后的水无法处理，只能作为污水排放，既损失热能，又引起公害，甚不合理。

鉴于以上两种方法的不合理性，发展了采用高压水蒸发吸热以间接冷却裂解气的方法，这就是采用急冷废热锅炉。此锅炉所产生的蒸气用来作为拖动压缩机的动力和裂解工艺蒸气。在本装置中，急冷废热锅炉所产生的高压蒸气可以满足全部装置所需高压蒸气量的 $50\% \sim 70\%$ 。此法既避免了油淬、水淬冷却的缺点，并能有效而经济地回收热能。但是正如前面所述，由于裂解气的高温 and 含焦，而且要求急速冷却，一般需在约 0.05 s 内冷却，所以给设计带来了一些困难，这些困难，随着科学和工业技术的发展，现在已基本解决。

引进的 30 万吨/年乙烯装置中有 22 台急冷废热

锅炉，其中 20 台是轻柴油裂解急冷废热锅炉，每台轻柴油裂解炉配 2 台急冷废热锅炉，其余两台是乙烷废热锅炉，它们与一台乙烷裂解炉相配，每两台急冷废热锅炉配一个气包。

以上两种急冷废热锅炉的工艺参数，除裂解气侧的工作温度不同而外，其余基本相同，蒸气侧的工作压力均为 $124 \times 10^5 \text{ Pa}$ 表压，工作温度均为 326°C ，裂解气侧的工作压力均为 $1.07 \times 10^5 \text{ Pa}$ 表压。蒸气产量：轻柴油裂解急冷废热锅炉平均为每台 10 t/h ，乙烷裂解急冷废热锅炉平均为每台 9.94 t/h 。

在 $124 \times 10^5 \text{ Pa}$ 表压的压力下，沸腾水的气化潜热为 1177.54 kJ/kg ，由上述工艺参数我们可以估算出平均每台轻柴油裂解急冷废热锅炉所能回收的热量约 $11.78 \times 10^6 \text{ kJ/h}$ ，每台乙烷裂解废热锅炉所回收的热量约 $11.70 \times 10^6 \text{ kJ/h}$ （预热给水 and 过热蒸气的热量因为数据不全，未计算在内），故 20 台轻柴油裂解废热锅炉和 2 台乙烷裂解废热锅炉共计每小时可能回收的热量约为 $259 \times 10^6 \text{ kJ/h}$ ，每年（以 7200 h 计）可以回收热量共约 $1864800 \times 10^6 \text{ kJ}$ ，这一数字相当于标准煤（热值 29307.6 kJ/kg ） 63628.6 t ，可见其节能数量 and 经济效益是相当巨大的。

三、硫酸工业

制造硫酸的原料有硫黄和硫铁矿两种（冶金工业的锌精矿也是附产硫酸的原料）。以硫黄为原料制造硫酸，其反应式和放出的热量如表 1-2 所示。

表 1-2 硫黄制造硫酸的反应热

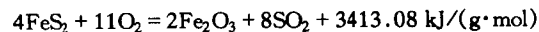
化 学 反 应	$\Delta H, \text{ kJ/g}\cdot\text{mol}$
喷烧: $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$	-296.84
氧化: $\text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{SO}_3$	-98.39
吸收: $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$	-137.33
稀释: $\text{H}_2\text{SO}_4 + x\text{H}_2\text{O} = 98.5\% \text{ 浓硫酸}$	-1.26
总反应: $\text{S} + 1\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$	$\Delta H = -535.91$

由表 1-2 可见，如果将其放出的热量收回 95% ，每生产 1 t 硫酸将可回收热量：

$$Q = \frac{535.91 \times 1000}{98} \times 1000 \times 0.95$$
$$= 5.19 \times 10^6 \text{ kJ/t (H}_2\text{SO}_4\text{)}$$

一个年产 10 万吨的硫酸厂将可回收热量 $5.19 \times 10^{11} \text{ kJ/a}$ ，这相当于 17709 t 标准煤。

用硫铁矿作原料制造硫酸，其燃烧硫铁矿的反应式如下：



故每摩尔 SO_2 生成时放热为 $\Delta H = -426.63 \text{ kJ/g}\cdot\text{mol}(\text{SO}_2)$ ，加上氧化 SO_2 、吸收 SO_3 、稀释等的放热，则每生产 1 t 硫酸，总共放热为 $(158.5/98) \times 10^6 =$

6.78×10⁶kJ/t (H₂SO₄)。如果将其热量回收 95%，一个年产 10 万吨的硫酸厂，约可收回热量 6.45 × 10¹¹kJ，这相当于 22000t 标准煤。不过硫铁矿沸腾焙烧炉的炉灰要带走一些热量，较难回收，但至少应和燃硫制酸回收热量差不多。

旧式的硫酸厂，仅在焚硫炉后或在沸腾炉后设置废热锅炉，且锅炉压力不高，蒸气没有作为动力应用。这种废热锅炉仅回收热量约 55%~60%，且没有作为动力，而所用的风机、泵等还要用电厂的电力，这是很不合算的。稍为新一些的厂，除上述废热锅炉外，还在 SO₂ 氧化成 SO₃ 的转化器中间或其后设置转化气冷却器以预热给水。但是对于三氧化硫吸收和硫酸稀释的热量，一般都是用冷却水通过冷却器而排放掉了。20 世纪 70 年代后期，文献 [8] 报道了“Browder”双系统接触法制造硫酸的新流程，该流程如图 1-1 所示。

该流程的特点在于不但回收了硫黄燃烧气体的高温高品位热能，以水作工质产生蒸气拖动蒸气轮机发

电，而且还利用了转化气和 SO₃ 吸收及酸稀释的低温低品位热能，以丙烷作工质产生丙烷蒸气并过热，用来拖动丙烷气轮机发电（与蒸气轮机同轴），故回收的热量较多。一个产量为 1800t/d 的硫酸厂，可输出剩余动力 6200kW。而设备的投资费用新厂仅为老厂的 88%。

对于硫铁矿沸腾焙烧炉炉气冷却的废热锅炉，其蒸气工作压力国外一般采用 36、40 或 65 × 10⁵Pa 表压，这是由于沸腾炉炉气含水分和 SO₃ 较高，其露点温度也较高（约 275~330℃）的缘故。对于硫黄燃烧炉则是把熔融的硫黄用干燥空气喷雾燃烧的，而且因为没有“沸腾”矿粉的催化作用，所以炉气中不含水分，SO₃ 含量也低，因而其露点很低，所以安装在硫黄喷烧炉后的废热锅炉，可允许采用较低蒸气工作压力，至于具体选取多大工作压力合适，需根据燃烧炉气所含 SO₃ 和水蒸气量而定。国外某厂的硫铁矿沸腾焙烧炉炉气冷却用废热锅炉的主要指标如表 1-3 所示。

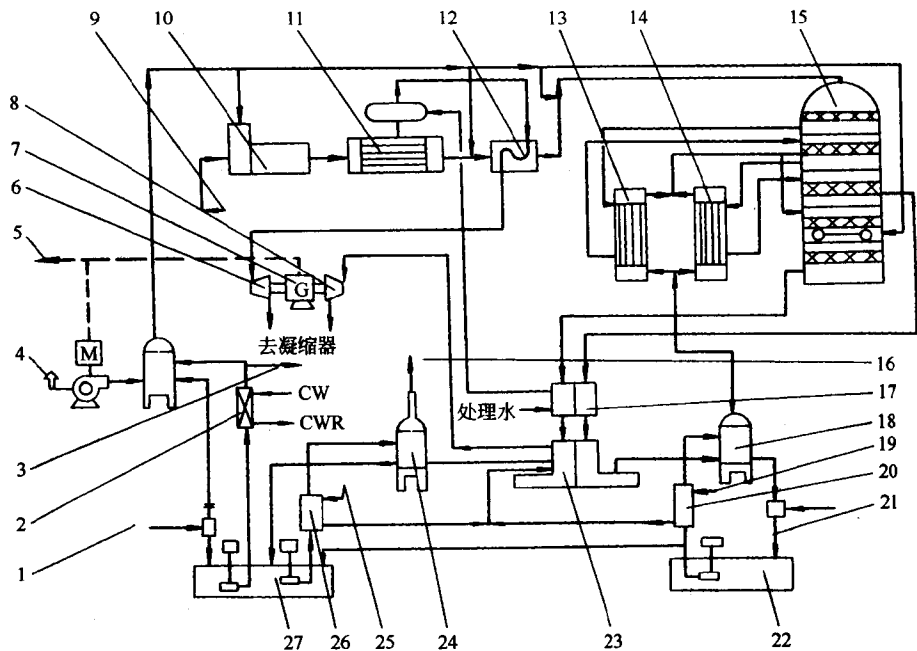


图 1-1 Browder 双系统接触法制硫酸流程

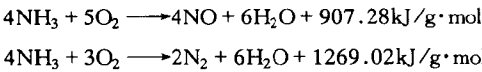
1—水；2—酸冷却器；3—成品酸；4—空气进口；5—动力输出；6—蒸气轮机；7—发电机；8—丙烷气轮机；9—硫入口；10—燃烧炉；11—锅炉；12—过热器；13—I 号换热器；14—II 号换热器；15—转化器；16—烟道气；17—省热器；18—吸收塔；19—丙烷进口；20—酸冷却器；21—水入口；22—泵、储槽、98% 酸泵；23—蒸气过热器；24—吸收塔；25—丙烷进口；26—酸冷却器；27—泵、储槽、98% 酸泵

表 1-3 硫铁矿沸腾焙烧炉炉气冷却废热锅炉技术条件

锅炉型式	数量 台	蒸气压力 Pa 表压	蒸气温度 ℃	给水温度 ℃	锅炉进口气量 Nm ³ /min	进口气温 ℃	蒸发量 kg/h	通风形式
水管式 (强制循环)	2	最高：48 × 10 ⁵ 常用：40 × 10 ⁵	250	120	最大：— 常用：530	最高：750 常用：650	最大：7580 常用：6650	抽风

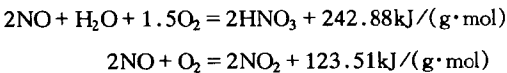
四、硝酸工业

在稀硝酸工业中，氨的接触氧化要放出大量的热，其反应式如下：



约 97% 的氨进行前一反应，3% 的氨进行后一反应。氨氧化炉的热散失约 5.3%，氨的氧化温度为 900℃。常压操作系统中，氧化氮气体出炉后，以 800℃ 温度进入废热锅炉，冷却至 450℃ 出废热锅炉，然后进入空气预热器进行热交换，氧化氮气体温度被冷却至 293℃。

在吸收制酸系统中，氧化氮混合气由 293℃ 降至 30℃，氧化氮的吸收与水蒸气凝缩均要放出热量，氧化氮的吸收反应如下式：



这部分热量，旧式的制酸设备都用冷却水吸收后弃掉，如果能回收利用，数量也是可观的。

一个年产 10 万吨硝酸（100% HNO_3 ）的工厂，假定氨氧化率为 97%，氧化氮吸收率为 98%，经过衡算，每小时的氨耗量约 $231.92\text{kg}\cdot\text{mol/h}$ ，氧化氮气体混合物带入废热锅炉的热量约 $58.03 \times 10^6\text{kJ/h}$ ，而带出的热量约 $31.4 \times 10^6\text{kJ/h}$ ，如果废热锅炉的热散失以 5% 计，则废热锅炉可回收的热量约 $26.63 \times 10^6 \times 0.95 = 25.3 \times 10^6\text{kJ/h}$ 。空气预热器回收的废热约 $8.55 \times 10^6\text{kJ/h}$ （热散失以 2% 计）。吸收冷却系统弃去的热量约 $49.95 \times 10^6\text{kJ/h}$ 。仅以废热锅炉和空气预热器回收的热量计算，每年可达 $33.85 \times 7200 \times 10^6 = 243722 \times 10^6\text{kJ/a}$ ，约相当标准煤 $8.316 \times 10^6\text{kg} \approx 8316\text{t/a}$ 。吸收冷却系统弃去的热量为 $49.95 \times 10^6 \times 7200 = 359640 \times 10^6\text{kJ/a}$ ，约相当标准煤 12271t/a。由上可见，吸收冷却系统废弃的热量比废热锅炉和空气预热器共回收的热量还大，如果能研究把吸收冷却系统的低温热能也利用起来，其数量也是可观的，每年有 $49.95 \times 7200 \times 10^6 = 359640 \times 10^6\text{kJ/a}$ ，不过这种低温热能的熵大，品位低，有效能及热效率率低。

下面举一硝酸废热锅炉实例。我国 $4.0 \times 10^5\text{Pa}$ 全加压法 80000t/a 硝酸生产废热锅炉的情况如下：

该设计把氨氧化炉、蒸气过热器和废热锅炉等作成一台设备，如图 1-2 所示，可见设备简化是其特点。该设备的炉头（氨氧化炉）、蒸气过热器和废热锅炉等的技术特性见表 1-4、表 1-5 及表 1-6。

由表 1-6，根据废热锅炉的蒸发量，我们可以估算出每台锅炉回收的余热量为 $14.3 \times 1000 \times (669.13 - 170) \times 4.1868 = 29883532\text{kJ/h}$ ；由表 1-5，可以估算出蒸气过热器所能回收的热量为 $14.3 \times 1000 \times$

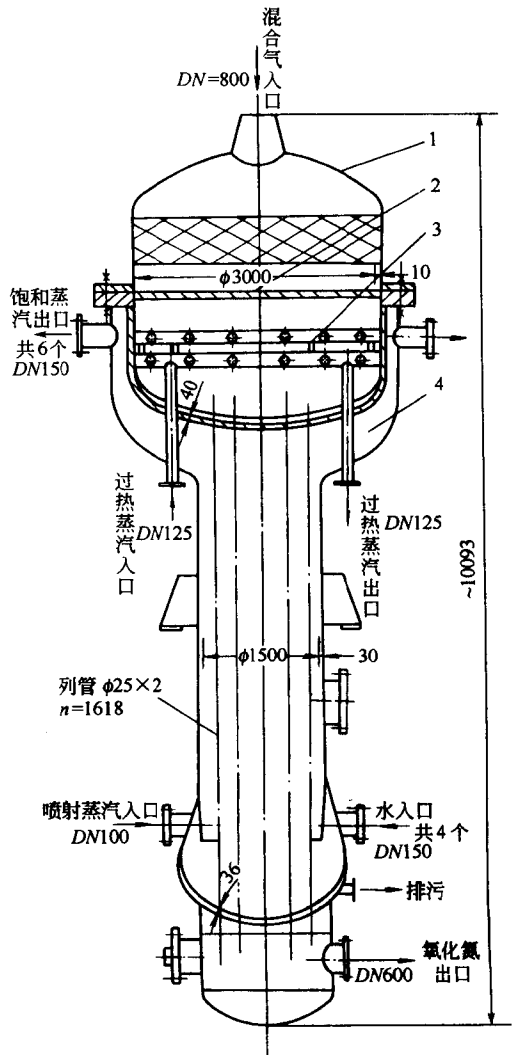


图 1-2 氨氧化炉及废热锅炉
(8 万吨/年全加压硝酸车间设备)

1—氧化炉；2—铂网；3—蒸气过热器；4—废热锅炉

表 1-4 氨氧化炉炉头技术特性

序号	名 称	指 标
1	物料名称	入口 氨、空气混合气
		出口 NO 、 H_2O 、 O_2 、 N_2 气
2	设计温度,℃	入口 ~150
		出口 ~850
3	设计压力, Pa (绝压)	4×10^5
4	混合气浓度	~10.8% NH_3
5	氧化率	98%
6	铂网燃氨强度, kg/m^2	1200
7	催化剂	铂铑钨网 5 张
		纯铂网 1 张

表 1-5 蒸气过热器技术特性

序号	名 称	指 标		
		管 程		壳 程
1	设计温度,℃	入口	227	850
		出口	390	
2	设计压力, Pa	27×10^5		4×10^5
3	物料名称	过热蒸气		NO、O ₂ 、H ₂ O、N ₂
4	过热面积, m ²	~30		

表 1-6 废热锅炉技术指标

序号	名 称	指 标		
		管 程		壳 程
1	设计温度,℃	入口	745	227
		出口	250	
2	设计压力, Pa	4×10^5		27×10^5
3	物料名称	NO、H ₂ O、O ₂ 、N ₂		饱和水蒸气
4	给水温度,℃			170
5	受热面积, m ²	523		
6	蒸发量, t/h	14.3		

$(768.1 - 669.13) \times 4.1868 = 5925456.6 \text{ kJ/h}$; 两者共回收热量 $Q_T = 35808988 \text{ kJ/h}$ 。如果每年以 300 天 (7200h) 计算, 则每台废热锅炉每年可回收余热 $25.78 \times 10^{10} \text{ kJ}$, 这一数量约相当于标准煤 (热值 = 29307.6 kJ/kg) 8797 t/a , 可见回收的余热是相当多的。

五、其他化学工业

除了前面所谈到的一些典型化学工业中的余热利用外, 其他还有不少化学工业也有余热可以回收。例如, 合成盐酸的氯化氢合成高温气, 二氯乙烷合成气、甲醇合成气、炭黑厂的废气等等, 都是有余热的, 但是有的工厂尚未回收。除了化学、石油化工而外, 其他如冶金工业、机械工业、造纸工业、玻璃搪瓷工业、建材工业等等, 也有大量余热可以回收利用。据统计, 化学工业的余热资源大约占整个行业燃料消耗量的 15%, 可见化学工业的余热资源是相当丰富的, 利用这部分余热的经济效益是相当大的。

第二节 废热锅炉的分类和系统及附件

一、废热锅炉的分类

和工业锅炉一样, 废热锅炉也可根据其工作条件和介质流动循环方式等的不同, 而将它们分为各种类型。

(一) 按工作压力分

一类为管壳式, 划属压力容器范畴, 需按《锅炉压力容器安全监察暂行条例》和《锅炉压力容器安全监察暂行条例实施细则》中有关压力容器部分和《压

力容器安全监察规程》进行安全监察和管理; 另一类为烟道式, 划属锅炉范畴, 按上述《条例》和《细则》中有关锅炉部分和《蒸气锅炉安全监察规程》进行监察和管理。

因此, 可以把管壳式废热锅炉按照压力容器的分法而将它们分为:

- ① 低压容器—— $1 \times 10^5 \leq p < 16 \times 10^5 \text{ Pa}$;
- ② 中压容器—— $16 \times 10^5 \leq p < 100 \times 10^5 \text{ Pa}$;
- ③ 高压容器—— $p \geq 100 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

但必须注意, 《压力容器安全监察规程》中已将内径小于 1m 的低压废热锅炉划为二类容器; 中压废热锅炉或内径大于 1m 的低压废热锅炉划为三类容器; 高压废热锅炉当然是三类容器。设计、制造、安装和使用管理等均须按照《压力容器安全监察规程》办理。

对烟道式废热锅炉, 《蒸气锅炉安全监察规程》中对压力分级无明确规定, 但对不同的附件监察管理也有不同的压力分级规定。例如安全阀进行调整和校验的压力即是按锅炉工作压力 $p < 1.3 \text{ MPa}$ 、 $1.3 \text{ MPa} \leq p \leq 3.9 \text{ MPa}$ 、 $p > 3.9 \text{ MPa}$ 来规定的。压力表的精确度选择, 则是按工作压力 $< 2.5 \text{ MPa}$ 的锅炉、工作压力 $\geq 2.5 \text{ MPa}$ 的锅炉、工作压力 $> 14 \text{ MPa}$ 的锅炉规定的。

(二) 按蒸发量分

根据蒸发量的大小, 以前工业锅炉的分法为:

- ① 小型锅炉—— 20 t/h 以下;
- ② 中型锅炉—— $20 \sim 75 \text{ t/h}$;
- ③ 大型锅炉—— 75 t/h 以上。

(三) 按气水循环方式分

1. 自然循环废热锅炉

传热管内 (或管外) 的水吸收热量后形成的气水混合物沿上升管而进入气包, 在气包中气和水经过分离后, 锅炉水则沿下降管而重新进入传热管内 (或管外), 形成循环。这种循环是靠气水混合物与锅炉水的重度差而实现的。

2. 强制循环废热锅炉

气水混合物和锅炉水的循环靠泵而实现。

3. 直流废热锅炉

用泵将给水强制通过加热管中, 一次通过即气化达 80%~90%, 故气水混合物分离后的水很少, 无需采用大的气包储存和循环, 仅加入给水即可。

(四) 按气、水流经管内或管外分

1. 火管锅炉

相当于工业锅炉的火管锅炉, 高温工艺气流经管内, 锅炉水流经管外而沸腾气化。

2. 水管锅炉

高温工艺气流经管外, 锅炉水流经管内而沸腾气化。

3. 双套管式锅炉

如 Schmidt 型, 高温工艺气走内套管内, 锅炉水走内套管之外及外套管之内的环隙而沸腾气化。

(五) 按结构特点分

在化工和石油化工生产中所用的废热锅炉结构可大致归纳为三大类。

1. 管壳式废热锅炉

这类废热锅炉与管壳式热交换器差不多, 主要是利用高温工艺气与水间接换热产生蒸气。但在不同的生产条件下 (压力、温度的高低不同), 由于解决的主要矛盾不同, 因而形成了各种不同的结构类型。如列管式、螺旋盘管式、U 形管式、插管式等等。

2. 烟道式废热锅炉

这类锅炉与一般的工业锅炉相类似。高温气体通过耐火材料砌成的炉膛, 与布置在炉膛内的排管中的水间接换热而产生蒸气, 高温气体的压力不高, 一般为常压, 但是温度则较高。

3. 双套管式废热锅炉

这类锅炉适用于高温高压, 高温低压或中温中压工艺气通过内套管内, 高压或中压锅炉水通过外套管与内套管之间而蒸发产生蒸气。例如 Schmidt 式柴油裂解乙烯急冷废热锅炉和 Sulzer 式氨合成气冷却废热锅炉即是。

(六) 按安装形式分

如果按安装的形式分, 还可分为立式、斜置式和卧式废热锅炉等。

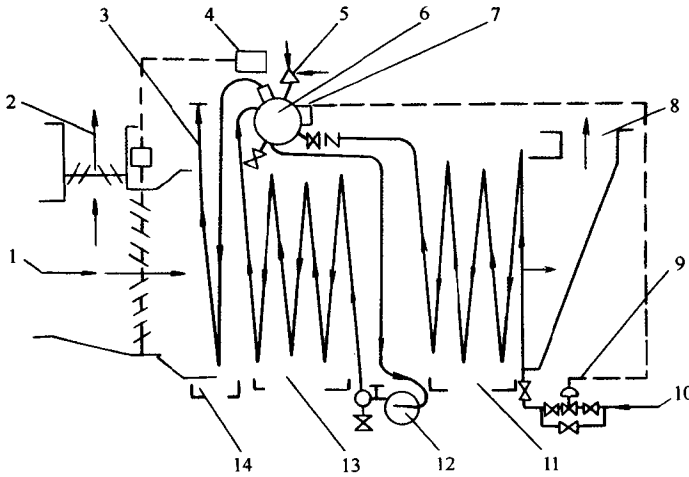


图 1-3 强制循环锅炉系统

1—高温气进; 2—旁路; 3—蒸气输出; 4—压力调节器; 5—安全阀; 6—气包; 7—水位调节器; 8—烟道; 9—给水调节器; 10—给水管; 11—省热器; 12—循环泵; 13—蒸发器; 14—过热器

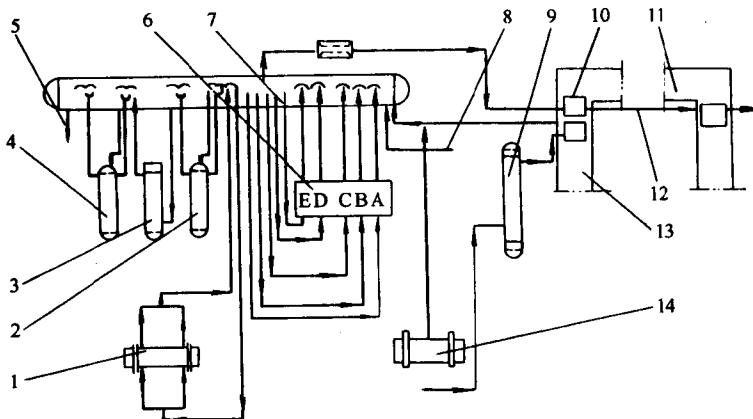


图 1-4 30 万吨/年合成氨厂废热回收系统流程图

1—中变废热锅炉; 2—一废; 3—二废; 4—三废; 5—排污; 6—辅锅; 7—气包; 8—加药管; 9—锅炉给水换热器; 10—过热器; 11—二段炉; 12—预热器; 13—锅炉给水加热器

二、废热锅炉的系统及附件

一般说,在高温气体为常压烟道气的场合,锅炉本体和过热器、省热器等都可装置在耐火砖砌的炉膛内,但是,如果高温气体是有压力的(低压或中高压)则采用管壳式或双套管式换热器的形式。至于选取水管式或火管式以及双套管式,则要看锅炉水和高温气的压力和温度如何而定。

废热锅炉的主体设备与辅助设备,有的集中在一台装置内,有的则分散在几处。图 1-3 所示为回收常压烟气或排放废气热量的强制循环锅炉系统的流程示意图。图中:锅炉本体(蒸发器)、省热器、过热器等都集中在炉膛内,气包则安装在炉外上方。此外,附件有循环泵、水位调节器、给水泵、给水调节器、安全阀、蒸气出口的压力调节器等。

图 1-4 所示为 30 万吨/年合成氨厂废热回收系统的流程。

第三节 废热锅炉的发展动向

自 20 世纪 70 年代以来,由于世界性的能源短缺,各工业部门都十分重视节约能源、回收余热,废热锅炉作为回收热能的主要设备,其发展也很迅速。综合废热锅炉的进展情况,主要有以下几点发展动向。

一、大型化

近代工业多趋向于大型化,因而废热锅炉也趋于大型化。例如 30 万吨/年的合成氨厂,其第一废热锅炉[二台,每台的换热面积为 341.87m^2] 每台可回收余热 $152.11 \times 10^6 \text{kJ/h}$, 而 20 世纪 60 年代初期的 10^5t/a 合成氨厂,其同样的转化气废热锅炉(仅一台),换热面积才 99.5m^2 , 每台回收余热量为 $33.49 \times 10^6 \text{kJ/h}$ 。此外,随着工业企业的大型化,每单位产品平均收回的余热热量也有所提高。例如 6 万吨/年的合成氨厂,每产 1t 氨,可回收 5.6t 压力为 $25 \times 10^5 \text{Pa}$ 表压的饱和蒸气,而 30 万吨/年的合成氨厂,每产 1t 氨可附产 6.45t 压力为 $105.5 \times 10^5 \text{Pa}$ 表压过热到 440°C 的过热蒸气。

二、高参数(高温、高压)

近代废热锅炉的另一趋向是把所产生的蒸气首先作为工厂本企业的动力应用,之后,再作为工艺用气或者供热,使能源的有效能利用更为合理,因而废热锅炉便成为动力锅炉了。为了提高此动力废热锅炉的蒸气质量和循环热效率,就需要提高蒸气进入气轮机之前的初参数(压力和温度)。例如,合成氨厂,老企业的造气车间的废热锅炉,其工作压力多为 $6 \sim 7 \times 10^5 \text{Pa}$, 所产蒸气仅作为工艺用气;即使是 20 世纪 60 年代初期用天然气催化转化制气的较新工厂,其废热锅炉的蒸气压力也不过 $27 \times 10^5 \text{Pa}$, 所产蒸气也仅作为工艺用气;而 30 万吨/年的合成氨厂,其废

热锅炉的蒸气压力则为 $105.5 \times 10^5 \text{Pa}$, 并且将蒸气过热到 440°C , 因为在这里,要利用背压式气轮机首先将高温、高压蒸气用于拖动大型氮氢气压缩机,热后抽出压力为 $30 \times 10^5 \text{Pa}$ 的乏气作为工艺用气以及利用中小型气轮机拖动中小型机泵之用。

三、自动化

废热锅炉的本体多半是安装连接在工艺生产流程中间的,锅炉前后都与工艺设备相连。因此,不但废热锅炉工艺气侧的操作条件会影响锅炉后续设备的操作条件和产品质量,而且锅炉侧的工作状况的变动(如压力大幅度波动、结垢过厚、气液分层……)都将通过传热面影响到工艺气侧的操作条件,以致引起整个生产流程的操作条件改变,导致产品的质量低劣、产量下降。还有由于废热锅炉趋向于高温高压动力蒸气锅炉,因而工作的可靠性、稳定性、安全性要求就更高。由于以上种种原因,要使废热锅炉在工艺生产过程中保证安全、稳定、连续可靠地正常运行,保证工艺产品的质量和产量,自动控制和自动调节就甚为必要了。所以现代大型废热锅炉的自动化程度较高。

四、定型化

凡可回收热能的工业装置目前都广泛采用废热锅炉,由于使用场合的不同,废热锅炉的结构形式也多种多样,根据国外的资料报道,竟超过 80 多种。因此,在一些国家里,已开始走向定型化。

五、高、中、低温余热同时开发利用

在过去,多着重高温余热的利用,所产蒸气作为工艺用气或动力用气。后来逐渐对中温余热也利用起来,使之产生中压蒸气供工艺或动力用,或者在有高温余热高压锅炉的场合用以预热高压锅炉的给水。现在,人们不但注意回收高、中温余热,而且还注意开发利用低温余热作为动力。以往,对于 250°C 以下的烟道气或 100°C 以下的水等的余热,均未充分利用,烟道气放入大气之中,冷凝水或冷却水则排入地沟,这样,不但损失了较多热量还污染了环境。自 20 世纪 60 年代末期以来,以低沸点有机介质(例如丙烷、异丁烷、氨、氟里昂等)作为工质利用低温余热产生中压蒸气拖动透平作为动力之用,引起了人们的注意。例如本章前节所述“Browder”双系统接触法制造硫酸的生产流程便是一例。但是,由于低温余热的质量低,热工效率低,其回收的技术难度较高,还有一些问题尚待进一步研究解决,所以目前还没有被广泛采用。

利用低沸点有机工质产生中压蒸气的蒸发器,就其温度高低而言,似乎不属于锅炉,但从蒸气的热力循环来看,实与锅炉无异,故上述利用低温余热以产生低沸点工质中压蒸气的蒸发器,按理亦应将其列入低温“废热锅炉”的范畴。

六、强化传热技术引入废热锅炉

近年来,由于强化换热元件取得了某些进展,因而有的强化换热元件已被引用到废热锅炉之中。例如把螺旋槽管用到废热锅炉,在相同管束的条件下,螺旋槽管锅炉可以大大提高产气量。这种元件已用到甲醛废热锅炉上。1980年3月在某溶剂厂一次试车成功。表面多孔管的多孔表面能够显著提高沸腾换热系数,在以乙烯-丙烯为工质的再沸器-冷凝器长期运行的结果表明,其换热性能大致保持在6倍于普通光管的水平上。内肋管对于冷冻剂氟里昂12的沫态沸腾换热系数要比光滑管高得多。以上两种强化换热元件已开始用于冷冻工程,将来有可能引入低温废热锅炉。热管是20世纪60年代兴起的新技术,它具有极高的导热能力和优良的等温特性。热管换热器已大量用于低温余热的回收,日本已有热管式空气预热器及热管式省煤器用于工业锅炉上,国内已在研究使用热管换热器来回收工业锅炉尾部烟气的余热,以之加热锅炉给水并获得成功。显然,这种技术可以用于废热锅炉用来回收低温工艺气余热以预热废热锅炉的给水。热管还可能应用在甲烷化反应中回收热量产生蒸气。以上这些仅仅是几个例子。今后,随着强化传热技术的发展,还可能有更多的强化换热元件引入废热锅炉。

七、出现外加热载体废热锅炉

对于高温固体或高温粒状物料的余热回收产生动力蒸气,就不能像一般废热锅炉那样将锅炉水与固体进行间壁换热。近年来发展了一种新技术,利用外加热载体首先对高温物体或颗粒物料进行冷却,而同时外加热载体则被加热成高温介质,然后利用此已被加热的高温介质作为废热锅炉的热源以产生动力蒸气或工艺用蒸气,外加热载体采用闭路循环。举例如下。

(一) 干法熄焦技术

一般生产焦炭时,1000℃左右的赤热焦炭是用水在大气中进行湿法熄焦的,以致产生的蒸气无法利用,而且操作条件恶劣。干法熄焦技术是利用惰性气体(如氮气)对赤热焦炭进行消火和冷却,吸收焦炭显热的惰性气体能被加热到约800℃,此高温惰性气体再通过废热锅炉以产生蒸气。经过换热后的惰性气体大约200℃,再回到焦化系统中冷却赤焦,循环使用。干法熄焦平均每吨焦炭回收的热量可产生 $40 \times 10^5 \text{ Pa}$ 蒸气约0.45t,如以发电量计算,则可发电100kW·h,而焦化生产中的最大耗电量是20kW·h/t,故干法熄焦中的净发电量可在80kW·h/t焦以上。

(二) 利用流化床回收高温颗粒物料的余热

高温颗粒物料的余热,可以利用惰性气体通过该高温颗粒物料的流化床来回收。在此流化床中,高温

粒料被冷却,惰性气体被加热,然后将加热后的惰性气体通过废热锅炉产生蒸气。

利用干法熄焦或流化床回收余热的技术,对某些化工生产中的固体或粉粒高温产品和废料(如窑炉产品或废渣)的余热回收也是可以采用的。

八、垃圾焚烧处理用废热锅炉

近年来,世界人口增加迅速,城市人口增加更快。有人就会有垃圾,上百万、千万人口的一些大城市,已被垃圾包围,环境堪忧。因而处理垃圾,势在必行。但城市垃圾的无害化、资源化处理,目前则是以焚烧处理为佳,它较其他填埋处理、堆肥处理都较优越,不会有二次污染。而焚烧处理,就有一个利用垃圾焚烧所产生的热能资源的问题。因此,利用废热锅炉回收其热能发电上网,在目前还是一种较为先进的方法,在工业发达国家,发展很快,如日本、北欧几个国家,70%~80%的城市垃圾都是用焚烧处理的,因而废热锅炉在垃圾处理领域获得了广泛应用。今后,随着城市的增多,人口的增加,垃圾的成灾,废热锅炉在垃圾焚烧处理方面,可能发展更大。

最后,还必须指出,废热锅炉的用途广泛,遍布于各行各业。本书限于篇幅和囿于行业范围,将着重介绍、讨论和研究近代石油化工中常用的先进废热锅炉及其元件的设计,而对正在开拓、发展的某些废热锅炉,例如低温废热锅炉、沸腾床废热锅炉、干法熄焦废热锅炉、强化传热废热锅炉……则暂付阙如,有待补充,尚望读者见谅。

参 考 文 献

- 1 成都工学院等编. 废热锅炉. 兰州石油机械研究所, 1975
- 2 "Survey of Energy Resources", 1974, United States "National Committee World Energy Conference"
- 3 Siberring L., Sulzer Heat Exchangers for Ammonia Production, "Sulzer Technical Review", 1969, Vol. 51, No. 2, p80-88
- 4 E. P. Wells, H. C. Mago and J. A. Finneran, New Ammonia Plant Feature Texas-Size Equipment, "The oil and Gas Journal", 1964, Vol. 62, No. 29, p92-95
- 5 N. M. Nimue, Energy Recovery in Ammonia Synthesis Plants, "The Chemical Engineer", July/Aug, 1967, No. 210, p156-162
- 6 H. Teeses, Energy Requirements and Energy Recovery in Ammonia Plants, "World Power Conference", Tokyo Sectional Meeting, 16-20 Paper 135 111A oct. 1966
- 7 30万吨/年合成氨装置“废热锅炉”设计计算和研制(上册). 合肥通用机械研究所, 1977
- 8 U. Sander, Waste Heat Recovery in Sulfuric Acid Plants "C. E. P." March 1977, Vol. 73, No. 3 P70-76