

化工设备设计全书

废热锅炉设计

化工设备设计全书编辑委员会

上海科学技术出版社

化工设备设计全书

废热锅炉设计

主 编

化学工业部设备设计技术中心站 方子风

编 写

成都科技大学

鄂西化工厂

中国武汉化工工程公司

华南理工大学

兰州石油化工设计院

上海医药设计院

中国成都化工工程公司

中国西安化工设计公司

四川省化工设计院

古大田

张洪波

王荣贵

黎廷新 胡 坚

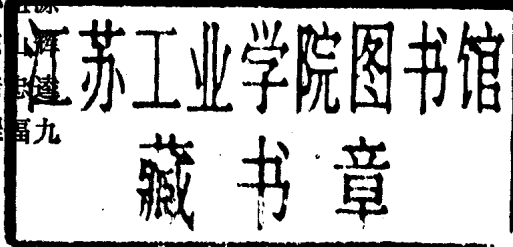
丁言礼

孙保源

陈 建

陆 建

程福九



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本分册根据废热锅炉的特点全面地叙述了它的经济效益、选型、结构设计、热力计算、阻力及水循环的计算、强度计算、用材、制造与安装及检验、用水和运行维护。重点介绍了结构与特殊元件的强度计算，并列举了生产实践中应用的典型废热锅炉的设计与制造的例子。

本分册可供从事废热锅炉的设计、制造与使用的工程技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

化工设备设计全书

废热锅炉设计

化学工业部设备设计技术中心站 方子凤主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏如东印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张35.25 字数843 000

1989年7月第1版 1989年7月第1次印刷

印数:1—4,100

ISBN 7-5323-0589-9/TK·5

定价: 20.15元

RC/242

前 言

鉴于广大化工设备设计人员的要求，在化学工业部的领导下，由化学工业部设备设计技术中心站组织全国近百所高校、工厂、科研和设计单位，共同编写了这部《化工设备设计全书》，供从事化工设备专业的设计人员使用。

《化工设备设计全书》以结构、强度的设计计算为主，从基础理论、设计方法、结构分析、标准规定、计算实例等方面进行系统的阐述，并对化工原理的设计计算作了简介。在实用的前提下，尽量反映国内及国外引进的先进技术，并努力吸取当前国外新技术动向，总之，本书旨在继续搞好设备结构、强度设计的同时，结合化工过程的要求去研究改进设备的设计，提高设备的生产效率，降低设备的制造成本，与化工工艺专业人员一起实现化工单元操作的最佳化。

本分册——《废热锅炉设计》依据废热锅炉的特点对它的经济效益、设计、制造与运行作了全面的阐述，重点介绍了总体及零部件的结构设计与废热锅炉使用的特殊元件的强度计算。鉴于废热锅炉在国内外尚未制定出专门的标准规范，因此介绍了一些典型废热锅炉的设计、制造与使用的经验。

本分册各章由下列同志编写：第一、三章古大田，第二章张洪波、王荣贵、丁言礼、孙钜源、胡坚，第四、九章张洪波，第五章黎廷新、方子风，第六章陈山辉、胡坚，第七章程福九、张洪波，第八章陆忠逵。

本分册由成都科学技术大学古大田同志、化学工业部设备设计技术中心站方子风同志统一全稿。

由于化工生产发展迅速，我们掌握情况有限，本分册的内容还会有不足和错误之处，热忱希望广大读者提出宝贵意见，以便再版时补充改正。

在本分册编写和审校的过程中，得到了很多单位和同志的大力协助和指导，在此致以深切的谢意。

本分册所用单位由上海科学技术出版社负责改为法定计量单位。

《化工设备设计全书》编辑委员会

1987年

《化工设备设计全书》编辑委员会

主任委员

洪国宝 燕山石油化学总公司设计院

副主任委员

黄力行 南京化学工业公司
李肇臻 化学工业部第六设计院
姚北权 化学工业部第四设计院
嵇定一 华东化工学院
寿振纲 国家医药管理局上海医药设计院
金国森 化学工业部设备设计技术中心站

委员

张冠亚 兰州化学工业公司设计院
杨慧莹 化学工业部第八设计院
汪子云 化学工业部化工设计公司
卓克涛 化学工业部第一设计院
苏树明 广东省石油化工设计院

目 录

第一章 总论.....	1
第一节 废热锅炉及其应用情况与经济效益.....	1
一、合成氨工业	2
二、乙烯工业	4
三、硫酸工业	4
四、硝酸工业	6
五、其他化学工业	9
第二节 废热锅炉的分类和系统及附件.....	9
一、废热锅炉的分类	9
二、废热锅炉的系统及附件	11
第三节 废热锅炉的发展动向.....	12
一、大型化	12
二、高参数(高温、高压).....	12
三、自动化	13
四、定型化	13
五、高、中、低温余热同时开发利用	13
六、强化传热技术引入废热锅炉	13
七、出现外加热载体废热锅炉	14
参考文献	14
第二章 废热锅炉的选型及结构设计.....	16
第一节 废热锅炉的选型.....	16
一、根据工艺气体的条件确定	16
二、按照材料、制造、安装和检修的条件确定	17
第二节 结构设计.....	17
一、废热锅炉的结构类型及特点	17
二、主要零部件的结构设计	82
第三节 辅助设备的设计.....	117
一、汽包的设计.....	117
二、上、下联箱的设计.....	145
三、清管器的设计.....	148
参考文献.....	153
第三章 热力计算.....	154
本章符号表.....	154
第一节 热力计算的目、步骤和常见物料的物理常数及其计算.....	156
一、热力计算的目和步骤.....	156
二、物理数据计算.....	158
三、石油化工常见物料的物理常数基础数据.....	176

第二节 传热计算	192
一、稳定传热	192
二、非稳定热传导	242
三、热量衡算与产汽能力计算	251
四、传热面积计算	258
五、废热锅炉的壁温计算	264
参考文献	278
第四章 废热锅炉的气侧阻力及水循环计算	280
第一节 气侧阻力计算	280
一、气侧阻力的计算步骤及方法	280
二、几种典型废热锅炉结构的气侧阻力计算方法	292
第二节 水侧自然循环的计算及设计	295
一、概述	295
二、循环回路中各项参数的确定及计算	299
三、循环回路系统的阻力计算	313
四、自然循环的工作特性曲线	338
五、自然循环的故障及循环可靠性的校验	339
六、自然循环回路的设计	347
七、几种典型废热锅炉的水循环计算方法	352
第三节 强制水循环计算	365
一、强制循环的计算步骤	366
二、强制循环回路的水力特性计算	366
三、强制循环可靠性的校核	368
第四节 直流无循环的水力计算	369
一、直流无循环系统的流动阻力计算及水动力特性曲线	370
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	370
参考文献	374
第五章 元件的强度计算	375
第一节 圆筒形元件	379
一、圆筒在内压作用下的计算	379
二、圆筒的边界问题	382
三、圆筒的温差应力	385
四、圆筒的低循环疲劳计算	386
五、圆筒在外压作用下的计算	389
第二节 封头	389
第三节 开孔的补强	391
一、概述	391
二、筒体大开孔补强	391
三、孔桥的管接头补强	392
第四节 法兰连接	393
一、法兰连接的设计计算	393

二、法兰连接在高温下出现的问题与可采取的措施	396
第五节 U形波纹膨胀节	399
一、概述	399
二、几种计算方法的分析比较	402
三、U形膨胀节的计算	411
四、许用应力	417
五、单层与多层膨胀节的性能比较	418
六、参数的分析与适宜尺寸的选择	419
第六节 管板	420
一、平管板	420
二、拉撑管板	423
三、拉杆薄管板	428
四、半螺旋管椭球管板	433
第七节 扁平集流管	435
一、西贝尔设计公式与存在的问题	436
二、集流管应力的计算	437
三、集流管壁厚的设计方法和公式	438
四、集流管拉筋和筋板强度	440
第八节 焊制三通、叉形管	440
一、焊制三通	440
二、等径叉形管	451
参考文献	452
第六章 材料	454
第一节 概述	454
一、废热锅炉的工况特点	454
二、合理选材和对金属材料的要求	457
第二节 波形膨胀节的选材	459
一、膨胀节的材料和防腐	459
二、其他零件的材料	460
第三节 金属材料的适用温度及压力范围和物理性能	461
第四节 废热锅炉用的耐火、绝热材料	464
一、国内废热锅炉防护用耐火、绝热材料情况	465
二、国外废热锅炉防护用耐火、绝热材料情况	470
参考文献	476
第七章 制造、检验和安装	478
第一节 制造和检验	478
一、概述	478
二、几种典型零部件的制造与检验	479
第二节 安装和检验	495
一、概述	495
二、安装前的准备工作	497

三、废热锅炉系统的安装与检验.....	523
参考文献.....	524
第八章 废热锅炉用水.....	525
第一节 水质要求.....	525
一、水质指标.....	525
二、水质标准.....	527
第二节 给水和炉水的处理.....	538
一、炉外处理.....	538
二、炉内处理.....	538
三、给水和炉水的补充处理.....	539
第三节 排污.....	541
一、定期排污.....	541
二、连续排污.....	542
参考文献.....	543
第九章 运行及维护.....	544
第一节 概述.....	544
第二节 准备工作.....	545
第三节 开车运行.....	546
第四节 停炉及维护.....	548
一、正常停炉.....	548
二、事故停炉.....	548
三、停炉后的维护.....	549
第五节 运行事故的处理.....	550
一、工艺气体出废热锅炉的温度超高或偏低.....	550
二、水位失常.....	551
三、超压.....	552
四、汽水共腾.....	552
五、水循环不正常.....	552
六、水质不良.....	552
七、气道堵塞或结焦.....	553

· 第一章 ·

总 论

第一节 废热锅炉及其应用情况与经济效益

废热锅炉系指那些利用工业过程中的余热以产生蒸汽的锅炉，其主要设备为锅炉本体和汽包，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 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$)、高炉炉气(约 1500°C)、需要冷却的化学反应工艺气($300\sim 1000^{\circ}\text{C}$)……等的余热即是如此。随着工业的发展和能源供求的紧张，因而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汽，以此作为供热、供汽、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汽的设备称为“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_2H_6 、己内酰胺……)的化学热能。从六十年代末期以来，利用低沸点介质研究利用低温(200°C 以下)气体的显热以产生动力蒸汽的“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。为了利用余热自给电力和动力以减少生产费用，所以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(蒸汽的压力和过热温度)以获取蒸汽循环较高的热效率，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，改成为高压过热蒸汽的动力锅炉，对于温度较低的余热利用，也尽可能设计成低压供汽锅炉，或者作为预热高压动力废热锅炉的给水之用。高压废热锅炉的蒸汽工作压力一般在 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汽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 $9.4\sim 12.7\text{MPa}$ 表压之内选取。我国引进的 30万 t/a 乙烯工厂的废热锅炉，其蒸汽工作压力即为 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 $(7\sim 12)\times 10^5\text{Pa}$ 表压工作的低压蒸汽锅炉，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 $169.6\sim 190.7^{\circ}\text{C}$,大大低于该炉气中水分与 SO_3 形成的硫酸的露点温度($270\sim 330^{\circ}\text{C}$),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°C ,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°C ,这样,不但可以安全地避免炉管遭受酸雾的腐蚀,而且可以提高蒸汽循环的热效率,多发电。很明显,废热锅炉选取了高的蒸汽工作压力,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后之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汽压力了。如果在选取了较低蒸汽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,为了提高热效率,动力废热锅炉的蒸汽工作压力,个别的达 $162\times 10^5\text{Pa}$ 表压,更高工作压力则少见。至于蒸汽的过热温度,一般均在 400°C 以上,有的高达 580°C ,但 $440\sim 560^{\circ}\text{C}$ 较多。

把废热锅炉自产的高压、高温过热蒸汽用来驱动大功率背压式汽轮机,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。从背压式汽轮机抽出的中压蒸汽,一部分用在凝汽式中压汽轮发电机发电,供本厂的各种中、小型机器和照明之用。另一部分中压蒸汽可以供中压工艺蒸汽用,或者供中压汽轮机直接拖动中型机器,而将其低压乏汽作为低压工艺蒸汽和采暖等用。这样一来,既节约了原料蒸汽,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。尤其是七十年代以来,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,蒸汽压力高低不等的水蒸汽作为动力之用,就需要有一系列的汽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

在六十年代后期,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。这些锅炉的蒸汽压力均为 $35\times 10^5\text{Pa}$ 表压,这是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,而蒸汽压力则均为 $105.5\times 10^5\text{Pa}$ 表压,蒸汽过热到 $440\sim 460^{\circ}\text{C}$,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

[8、6]报道,日产 1500t 的氨厂,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。

在我国除了七十年代引进的以及自己设计的 30万t/a 合成氨厂有如上述的高压动力废热锅炉而外,其余 10t/a、5 万 t/a 以及 5000t/a 等中、小型合成氨厂一般仅在煤造气、或天然气的蒸汽转化工段设置有废热锅炉,而且这类废热锅炉的蒸汽压力都为中、低压,并多是用作原料蒸汽,因此这类老厂,虽然或多或少地节约了产生原料蒸汽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煤筐反应后的热气体(约470~520°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汽,该锅炉的压力为 2.5MPa,以后准备发展到 4 MPa,由热衡算及试生产结果,产汽量为 0.8t 蒸汽/t 氨,按此计算,产氨 1 万 t/a 的合成氨厂,每年可回收 8000 吨蒸汽,能节省 1000t 原煤(热值 20934kJ/kg)。

对于 30万t/a 大型合成氨厂回收废热的经济效益情况如下:

(一) 我国七十年代中期建设的 30万t/a 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。

表 1-1 30万t/a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 [W/(m ² ·°C)]	平均温差 ΔT_m (°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
			共计	(128.37×10 ⁶)*	

注: 1. 本表数据由英制换算而来。

2. * 本数据由流程图的废热锅炉总产汽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。

由表 1-1 可见该厂回收的余热热量每小时约四亿七千三百万千焦, 这一数量相当于标准煤(热值 = 29307.6 kJ/kg) 16131 kg/h, 每年(按三百天计算)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 $\approx 34913.73 \text{kJ/Nm}^3$) $97.5 \times 10^6 \text{Nm}^3$ 即约一亿标准立方米, 这是多么巨大的一个数量。由于这些废热锅炉的高压蒸汽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 度。

(二) 在七十年代末期建设的 30万t/a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 $389.79 \times 10^6 \text{kJ/h}$ (由于蒸汽过热管的回收蒸汽缺乏数据, 未估算在内) 相当于标准煤 13.3t/h, 每年约为 95760t, 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 度。

(三) 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 1000t/d 合成

氨流程作过热量衡算,提出可供回收的余热量共约 155MW。155MW 相当于 556.84×10^6 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 $34913.73\text{kJ}/\text{Nm}^3$ 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。如果把蒸汽平衡、热平衡设计得最佳,并适当提高蒸汽参数以提高蒸汽循环的热功效率,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汽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 秒内将裂解气急冷到 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 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,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。此锅炉所产生的蒸汽用来作为拖动压缩机的动力和裂解工艺蒸汽。在本装置中,急冷废热锅炉所产生的高压蒸汽可以满足全部装置所需高压蒸汽量的 $50 \sim 70\%$ 。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 秒内冷却,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 t/a 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汽包。

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,蒸汽侧的工作压力均为 $124 \times 10^5\text{Pa}$ 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。蒸汽产量:轻柴油裂解急冷废热锅炉平均为每台 $10\text{t}/\text{h}$,乙烷裂解急冷废热锅炉平均为每台 $9.94\text{t}/\text{h}$ 。

在 $124 \times 10^5\text{Pa}$ 表压的压力下,沸腾水的汽化潜热为 $1177.54\text{kJ}/\text{kg}$,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 $11.78 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$,每台乙烷裂解废热锅炉所回收的热量约 $11.70 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ (预热给水和过热蒸汽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二台乙烷裂解废热锅炉共计每小时可能回收的热量约为 $259 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$,每年(以 7200h 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 $29307.6\text{kJ}/\text{kg}$) 63628.6t ,可见其节能数量和经济效益是相当巨大的。

三、硫酸工业

制造硫酸的原料有硫磺和硫铁矿两种(冶金工业的锌精矿也是附产硫酸的原料)。以硫

磺为原料制造硫酸,其反应式和放出的热量如表 1-2 所示。

由表 1-2 可见,如果将其放出的热量收回 95%,每生产一吨硫酸将可回收热量:

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

一个年产 10 万 t 的硫酸厂将可回收热量 $5.19 \times 10^{11} \text{kJ/a}$,这相当于 17709t 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:

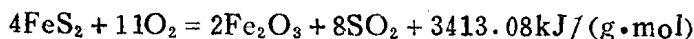


表 1-2 硫磺制造硫酸的反应热

化 学 反 应	$\Delta H (\frac{\text{kJ}}{\text{g}\cdot\text{mol}})$
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: $\text{S} + 1\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$	$\Delta H = -535.91$

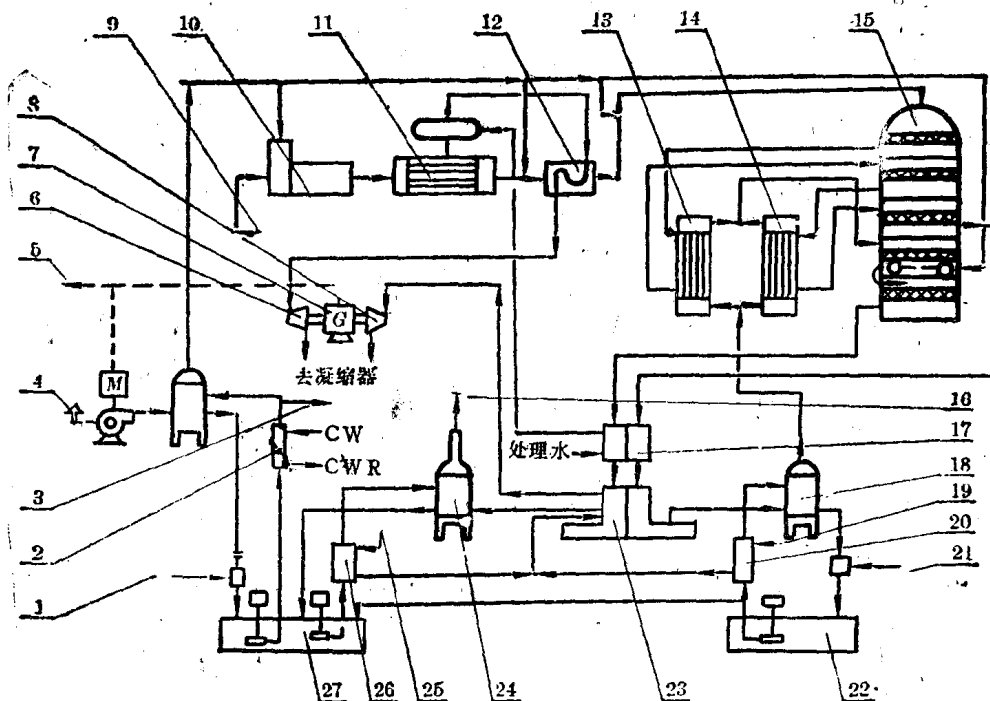


图 1-1 Browder 双系统接触法制硫酸流程

- | | | | |
|-----------|----------------|---------------|----------|
| 1—水; | 2—酸冷却器; | 3—成品酸; | 4—空气进口; |
| 5—动力输出; | 6—蒸汽轮机; | 7—发电机; | 8—丙烷汽轮机; |
| 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—蒸汽过热器; | 24—吸收塔; |
| 25—丙烷进口; | 26—酸冷却器; | 27—泵、储槽、99%酸泵 | |

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, 则每生产一吨硫酸, 总共放热为 $(158.5/98) \times 10^6 = 6.78 \times 10^6 \text{ kJ/t}(\text{H}_2\text{SO}_4)$ 。如果将其热量回收 95%, 一个年产 10 万 t 的硫酸厂, 约可回收热量 $6.45 \times 10^{11} \text{ kJ}$, 这相当于 22000 t 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, 但至少应和硫酸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, 蒸汽没有作为动力应用。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 SO_2 氧化成 SO_3 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。七十年代后期, 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磺燃烧气体的高温高品位热能, 以水作工质产生蒸汽拖动蒸汽轮机发电, 而且还利用了转化气和 SO_3 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汽并过热, 用来拖动丙烷汽轮机发电(与蒸汽轮机同轴), 故回收的热量较多。一个产量为 1800 t/d 的硫酸厂, 可输出剩余动力 6200 kW。而设备的投资费用新厂仅为老厂的 88%。

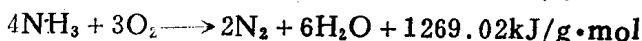
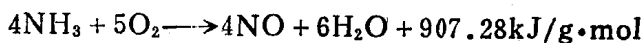
对于硫铁矿沸腾焙烧炉炉气冷却的废热锅炉, 其蒸汽工作压力国外一般采用 36、40 或 $65 \times 10^5 \text{ Pa}$ 表压, 这是由于沸腾炉炉气含水分和 SO_3 较高, 其露点温度也较高(约 275~330°C)的缘故。对于硫磺燃烧炉则是把熔融的硫磺用干燥空气喷雾燃烧的, 而且因为没有“沸腾”矿粉的催化作用, 所以炉气中不含水分, SO_3 含量也低, 因而其露点很低, 所以安装在硫磺喷烧炉后的废热锅炉, 可允许采用较低蒸汽工作压力, 至于具体选取多大工作压力合适需根据燃烧炉气所含 SO_3 和水蒸汽量而定。国外某厂的硫铁矿沸腾焙烧炉炉气冷却废热锅炉的主要指标如表 1-3 所示。

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)	蒸汽压力 (Pa表压)	蒸汽温度 (°C)	给水温度 (°C)	锅炉进口 气量 ($\frac{\text{Nm}^3}{\text{min}}$)	进口气温 (°C)	蒸发量 ($\frac{\text{kg}}{\text{h}}$)	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

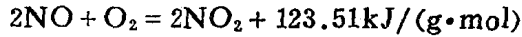
在稀硝酸工业中, 氨的接触氧化要放出大量的热, 其反应式如下:



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°C。常压操作系统中, 氧化氮气体出炉后, 以 800°C 温度进入废热锅炉, 冷却至 450°C 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°C。

在吸收制酸系统中, 氧化氮混合气由 293°C 降至 30°C, 氧化氮的吸收与水蒸汽凝缩均

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% HNO₃)的工厂,假定氨氧化率为97%,氧化氮吸收率为

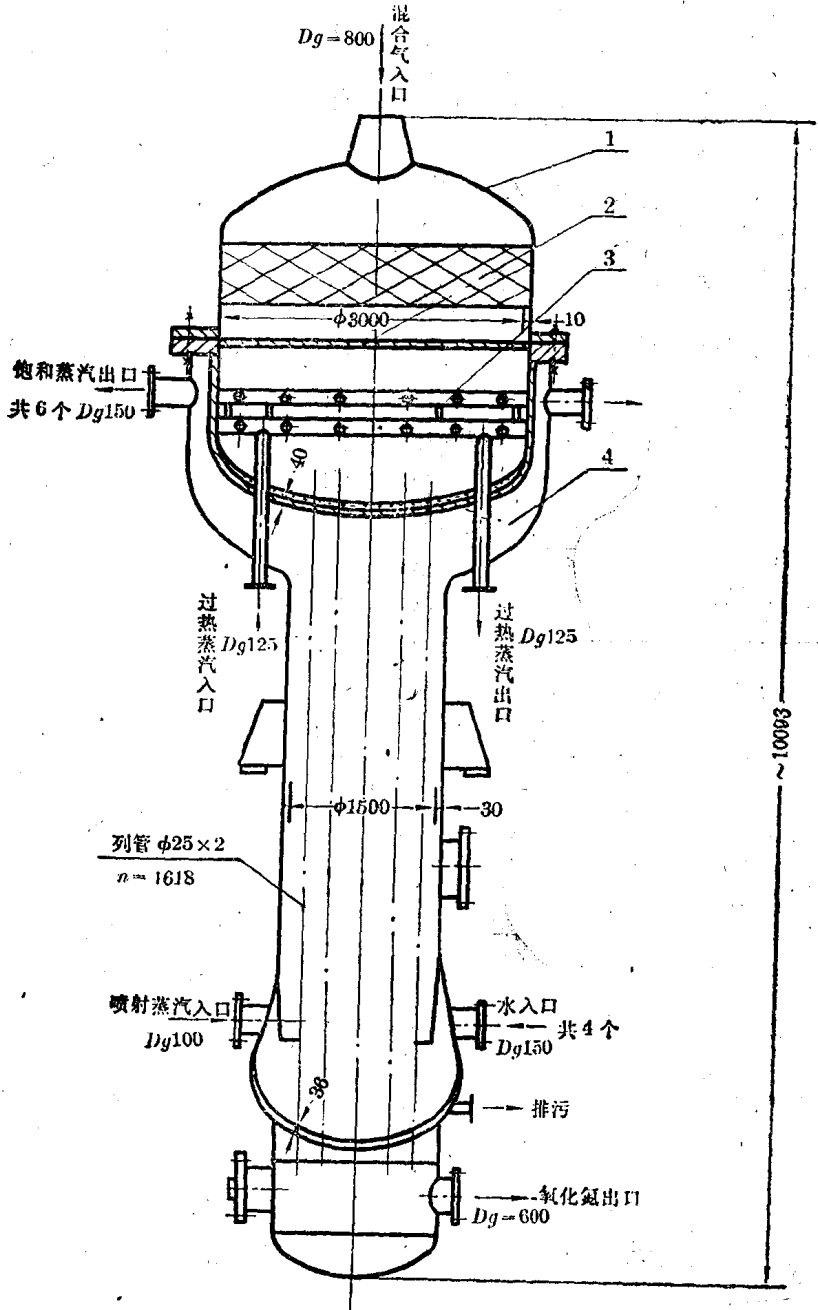


图 1-2 氮氧化炉及废热锅炉
(8万t/a全加压硝酸车间设备)

- 1—氧化炉; 2—铂网; 3—蒸汽过热器; 4—废热锅炉

98%，经过衡算，每小时的氨耗量约 $231.92\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{h}$ ，氧化氮气体混合物带入废热锅炉的热量约 $58.03 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ ，而带出的热量约 $31.4 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ ，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 $26.63 \times 10^6 \times 0.95 = 25.3 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ 。空气预热器回收的废热约 $8.55 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ （热散失以 2% 计）。吸收冷却系统弃去的热量约 $49.95 \times 10^6\text{kJ}/\text{h}$ 。仅以废热锅炉和空气预热器回收的热量计算，每年可达 $33.85 \times 7200 \times 10^6 = 243722 \times 10^6\text{kJ}/\text{a}$ ，约相当标准煤 $8.316 \times 10^6\text{kg} \approx 8316\text{t}/\text{a}$ 。吸收冷却系统弃去的热量为 $49.95 \times 10^6 \times 7200 = 359640 \times 10^6\text{kJ}/\text{a}$ ，约相当标准煤 $12271\text{t}/\text{a}$ 。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 $49.95 \times 7200 \times 10^6 = 359640 \times 10^6\text{kJ}/\text{a}$ ，不过这种低温热能的熵大，品位低，有效能及热功效率低。

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 $80000\text{t}/\text{a}$ 硝酸生产废热锅炉的情况如下：

该设计把氨氧化炉、蒸汽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）、蒸汽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。

表 1-4 氨氧化炉炉头技术特性

序号	名 称	指 标	
		入口	出口
1	物料名称	氨、空气混合气	
			NO 、 H_2O 、 O_2 、 N_2 气
2	设计温度($^{\circ}\text{C}$)	~150	
			~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 蒸汽过热器技术特性

序号	名 称	指 标		
		管 程		壳 程
1	设计温度($^{\circ}\text{C}$)	入口	227	850
		出口	390	
2	设计压力(Pa)	27×10^5		4×10^5
3	物料名称	过热蒸汽		NO 、 O_2 、 H_2O 、 N_2
4	过热面积(m^2)	~30		