

年产三十万吨合成氨厂

废热锅炉及其 安全运行

大连工学院 盛展武

化学工业出版社

南京江北新材料涂装厂

废热锅炉及其 安全运行

王 强 王 强 王 强 王 强

南京江北新材料涂装厂

南京江北新材料涂装厂

年产三十万吨合成氨厂

废热锅炉及其安全运行

大连工学院 盛展武

化学工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍年产三十万吨合成氨厂中的高压废热锅炉。全书共十二章,内容包括废热锅炉的结构、锅内的流体力学、传热及热化学过程,高温高压锅炉中的热应力及炉管的超温爆裂和运行要点。书中分析了近年来国内外在废热锅炉中发生的一系列事故实例及其安全运行的规律性。同时也简单地介绍了乙炔装置中的废热锅炉。

本书可供年产三十万吨合成氨厂的工人阅读,也可供有关工程技术人员、管理人员参考。

年产三十万吨合成氨厂 废热锅炉及其安全运行 大连工学院 盛展武

责任编辑:满秀敏

封面设计:许立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₃₂印张10¹/₄字数234千字印数1—2,370

1984年8月北京第1版1984年10月北京第1次印刷

统一书号15063·3612定价1.35元

限国内发行

目 录

第一章 概论	1
第一节 化学工业中的余热	1
第二节 化工用废热锅炉的特点	6
第三节 废热锅炉的事故	9
第二章 废热锅炉的结构	13
第一节 结构类型	13
第二节 列管式废热锅炉	15
第三节 刺刀管废热锅炉	22
第四节 U形管废热锅炉	29
第五节 双套管废热锅炉	34
第六节 烟道式废热锅炉	39
第七节 螺旋管废热锅炉	41
第三章 水蒸汽	43
第一节 水蒸汽的生产	43
第二节 水蒸汽的状态参数	48
第三节 水蒸汽的热力性质图	52
第四节 水蒸汽的热效率	55
第四章 废热锅炉的生产能力	60
第一节 产汽量	60
第二节 排气温度	66
第三节 炉管结垢及事故实例	73
第五章 锅炉中的传热过程	79
第一节 传热的基本方式	79

第二节	沸腾传热	93
第三节	炉管内的流型	96
第四节	沸腾危机	103
第五节	刺刀管的传热特点及事故实例	109
第六章	锅炉中的水循环	116
第一节	基本概念	116
第二节	流体阻力计算	125
第三节	影响水循环的因素	136
第四节	刺刀管锅炉的逆循环及事故实例	141
第五节	U形管锅炉的水循环及事故实例	158
第七章	锅炉的腐蚀	166
第一节	金属腐蚀的基本原理	166
第二节	气侧腐蚀	169
第三节	水侧腐蚀	172
第四节	腐蚀实例	178
第八章	锅炉水质	182
第一节	水质对锅炉的影响	182
第二节	水质处理	184
第三节	水质标准	192
第四节	锅炉排污	196
第五节	水质不良引起的事故实例	199
第九章	蒸汽品质	204
第一节	蒸汽的品质要求	204
第二节	蒸汽的污染	205
第三节	影响蒸汽品质的因素	208
第四节	汽水分离器	214
第五节	蒸汽带水事故实例	221
第十章	炉管的超温和爆裂	228
第一节	超温和过热	228

第二节	炉管在高温下的性能	233
第三节	超温对炉管寿命的影响	245
第四节	影响超温的因素	250
第五节	炉管的爆裂实例	258
第十一章	废热锅炉中的热应力	261
第一节	事故实例	261
第二节	热应力的产生	263
第三节	稳定热应力的计算	264
第四节	非稳定热应力	275
第五节	废热锅炉的升温要求	285
第六节	锅炉用钢	290
第十二章	废热锅炉的运行与维护	297
第一节	运行要点	297
第二节	清洗	304
第三节	停用时的防腐	309
附录 I	饱和蒸汽热力特性 (以温度为准)	312
附录 II	单位换算表	314
附录 III	锅炉钢材的机械强度	316
附录 IV	锅炉钢材在高温下的物理性能	318
主要参考资料		320

第一章 概 论

化学工业是耗能较多的一个部门，而且化工生产中的能量利用率很低，热能的浪费和耗损现象很严重。随着世界性能源危机的出现，以及化工生产技术的发展，采用废热锅炉来回收化工生产中的余热以生产动力蒸汽，日益得到重视。作为能量回收的废热锅炉是一种高温高压设备，在生产中比较容易发生各种事故。为了保证废热锅炉有效地生产和安全运行，必须对这种高温高压设备的特点和基本规律有充分的了解和基本掌握。

第一节 化学工业中的余热

一、化工生产中的能耗

化工原料在经历一系列的预处理、单元操作以及化学反应转化成为产品的过程中，同时也将原料中所具有的能量转化成产品中具有的能量，当然在生产中还消耗了一定的能量。化工生产过程也可以看成是“能量的转化和消耗过程”。化工生产所消耗的能量有以下一些形式：

1. 热能——许多化工单元操作如精馏、蒸发、结晶、干燥、化学反应等，都需要消耗大量热能。
2. 机械能——流体的输送、压缩、离心分离、粉碎、搅拌等过程都需要外功，也就是需要向这些过程提供机械能。
3. 电能——一般称为二次能源，在化工厂中电能除了转化为机械能外，也用于电解和电热。

工业相继发生了一场以“装置大型化”为中心的技术革命。这场革命的主要成就之一就是在化工生产中引进了高压废热锅炉、蒸汽透平和离心压缩机。通过充分回收生产过程中的余热和余压，将动力系统和工艺系统紧密地结合起来，从而使合成氨生产过程中的热能利用率从50年代的30%左右提高到50%以上。影响这场技术革命的主要因素是：

1. 能源危机改变了化工生产中产品成本的经济结构 国外由于能源危机的出现，天然气的价格在过去的10年中上涨了15倍，这对以天然气为原料和燃料的化工生产来说，产品成本的上涨也是十分厉害的。而且在产品成本中，原料和燃料所占的比例也越来越高，迫使人们对于能量的经济利用问题提到一个新的高度来认识。如果说在早期年代中，化工工程师们较多地关心物料平衡，那末现在首先要注意生产过程中的能量平衡，并且以每吨产品耗能指标来衡量一个生产工艺的优越性。

2. 装置大型化使热流量较为集中 随着化工生产规模扩大，单位时间通过设备的物流量也增多，从而在生产过程中散失于环境中的“废热”也相应地增加。废热较为集中地从生产过程中散失出来，不仅降低了能量的有效利用率，而且也造成了环境的热污染。如合成氨装置的规模扩大到年产30万吨以后，其能耗还维持在以前小厂的水平，那么从生产中每小时散失的热量达150百万大卡。这样巨大的热量相当于将2000吨的水从30℃加热到沸点。显然，这样严重的热污染也是不能容忍的。装置大型化后使余热的热流量也较为集中，从而为热量的回收也提供了有利条件。

3. 动力系统引入化工生产 前两个因素提出了在化工生产中回收余热的必要性和迫切性，但是只有将动力系统引入化工生产以后，才使余热回收成为可能。余热回收的主要途径是

通过高压废热锅炉生产高压蒸汽，并以这些高压蒸汽作为动力源来驱动蒸汽透平从而转化为机械能。因此可以认为高压废热锅炉是能量回收系统中极为重要的一个环节，直接影响着化工装置的能耗指标和产品的生产成本。以合成氨装置为例，是否回收余热以及余热回收程度的不同，每吨氨产品的能耗指标差别很大，如表1-1示。

表 1-1 合成氨装置的能耗比较

装置规模，吨/天	余热回收情况	能 耗 指 标	
		耗电，度/吨氨	天然气，米 ³ /吨氨
400	基本上没回收	1500	1250
400	回收低压蒸汽	895	1040
1000	回收动力蒸汽	19	870

从表1-1中可以看出，目前国内中小型合成氨装置中，由于没有回收余热每吨合成氨的耗电指标达1500度以上。但是在大型化的氨生产装置中，由于能量回收的结果，可以达到基本上不需外供电。一个年处理量为240万吨的大型催化裂化装置，可供回收的能量达2万千瓦。显然，其数量是十分可观的，对生产成本的影响也是很大的。

三、回收余热的方法

化工生产中，回收余热的方法很多。例如将带有高温余热的物流直接预热原料、燃料、助燃用的空气以及中间产品，或者用以干燥产品。也可以用这部分热量作为供暖或加热生活用水。显然，这种回收余热的方法是有很大局限性的，热量回收

的程度往往也不理想。

有些场合，生产中的余热也可以利用某种工作物质来间接回收。工业上应用的“热管”和“热泵”都是利用工质来回收热量的实例。当然，最简单最常用的方法就是利用锅炉来回收工艺物流中的余热，生产蒸汽。通常这种回收余热生产蒸汽的锅炉称之为余热锅炉或废热锅炉。本书中尊重习惯的称呼仍称作废热锅炉。

化工生产中很早就使用废热锅炉来回收热量，如以煤制氨的造气车间中、以氨氧化制硝酸的车间中、焙烧硫铁矿制硫酸的车间中都采用了废热锅炉。但是这些废热锅炉大都是低压的，其主要着眼点是冷却工艺气体，所产的蒸汽在生产中是微不足道的。废热锅炉只是作为一般辅助性设备，在整个生产装置中也是无关紧要的。

随着生产技术的发展，废热锅炉的参数逐渐提高，尤其当动力系统引入化工生产以后，废热锅炉由生产低压蒸汽的工艺锅炉转变为生产高压蒸汽的动力锅炉。废热锅炉在整个装置中的地位也发生了重要的变化。因为废热锅炉作为整个装置的动力源，其运行工况直接关系到装置中的整个生产过程。因此，在这种情况下废热锅炉往往成为整个装置不可分割的关键性设备之一。生产过程对于废热锅炉的依赖性也日益增大，而对废热锅炉的重视程度也必然相应地增加。

作为动力应用的废热锅炉，其趋向也象通用的动力锅炉一样，向着高温、高压和大容量方向发展。大型高压锅炉的热效率高、单位功率的金属消耗量低。例如将蒸汽参数从35大气压435℃提高到90大气压500℃时，热效率约提高12%。当动力锅炉向大型高压方向发展以后，无论锅内过程或者锅炉结构都会带来一些新的问题，从而需要采取相应的措施。

第二节 化工用废热锅炉的特点

一、动力锅炉的特点

化工装置中的废热锅炉,当其生产压力较高的动力蒸汽时,首先要满足普通动力锅炉的一些要求。

1. 动力锅炉首先要求热效率高。锅炉热效率指的是送入锅炉的热量有效利用的程度,在废热锅炉中也就是从高温工艺气中回收的热量与锅炉的热损耗和给水泵等辅助设备的功耗之间的差值。

2. 其次要求结构简单、成本低。锅炉的金属耗量比较大,一台动力锅炉的总投资往往很大。锅炉的成本通常以每吨蒸汽所耗钢材的吨数来表示,设计的废热锅炉应该尽可能降低钢材的耗量。

3. 要求安全可靠。高压锅炉在运行时具有很高的能量,尤其作为化工装置中的动力锅炉,影响的面较广,一旦突然发生事故不仅危险性较大,而且造成的损失可能远超过锅炉本身的价值。因此能否确保锅炉安全运行,是动力锅炉的重要问题。

二、废热锅炉热源的特点

由于废热锅炉所用的热源与一般动力锅炉不同,因此还具有一些与一般动力锅炉所不同的特点。废热锅炉的热源——高温工艺气体具有以下一些特点:

1. 高温、高压 一般动力锅炉中的热源是煤、油、天然气等燃料,这些燃料在锅炉内燃烧时尽管温度很高,但压力是不高的。可是化工生产中,作为废热锅炉热源的工艺气体不仅温度很高而且还经常具有较高的压力。例如以天然气为原料的合成氨生产中,废热锅炉进口气体的温度为 1000°C ,压力为 $32\sim 40$ 公斤/厘米²;乙烯生产中的裂解气废热锅炉进口温度为

900℃，压力为80~140公斤/厘米²；而在制氢装置中使用的废热锅炉进口温度高达1500℃，压力为80~100公斤/厘米²。这种高温高压的操作条件，对锅炉结构提出了一些特殊要求，例如需要解决高温热应力，高温腐蚀等。

2. 排气温度需要控制 在一般的动力锅炉中，为了获得较高的热效率，燃料气体从锅炉中的排出温度应该尽可能低些。但是对于化工生产中的废热锅炉，在多数情况下不仅是为了回收废热，而且往往是用它来控制反应气体的温度。也就是说，废热锅炉出口气体的温度高低主要取决于后继工序的工艺要求而不是锅炉的热效率。就这点而言，废热锅炉在生产装置中实际上是用作冷却气体的工艺设备。

废热锅炉的出口气温在某些情况下还受着高温工艺气的露点所限制。尤其当反应气体中含有腐蚀性组分(如CO₂，SO₂，H₂S等)时，如果气体温度在锅炉中被冷到它的露点以下，就会析出酸雾使锅炉发生腐蚀。因此在这种情况下废热锅炉的出口温度必须严格控制在露点以上。同样，锅炉的蒸汽压力也必须足够高，以使其饱和温度高于反应气的露点。

为了保证后继工序生产操作上的稳定性，不少废热锅炉带有气温调节装置，以便在流量、温度发生波动的情况下，用它来保证恒定的出口温度。

3. 要求控制高温工艺气的冷却速度 在化工生产过程中，用废热锅炉来冷却高温工艺气体时，有时不仅需要控制气体的出口温度，而且还需要控制气体的冷却速度。工艺气在废热锅炉中的降温速度有时会直接影响它的组成和结焦情况。例如在用石脑油、轻柴油裂解制取烯烃的生产中，裂解炉出口高温裂解气体在815℃以上。为了防止裂解气体在高温下二次分解，使目的产物损失，需要在极短时间内把裂解气急冷到400℃左

右，以使裂解反应基本停止。否则高温裂解气不仅会进一步发生二次反应，使乙烯收率降低，而且还会在炉管上结焦，严重时会使生产中断。因此紧接在裂解炉出口处的废热锅炉，其主要的任务是使高温裂解气急冷。即锅炉结构首先着眼于如何保证热裂解气体快速通过，均匀地冷却。这种废热锅炉的压降要特别小，流速要很高，而且气体在炉管间的分配要尽量均匀。

4. 要求压降低、避免泄漏 对于普通的动力锅炉来说，燃料燃烧后的烟道气在锅炉内的阻力大小与漏损情况，往往并不是太重要的。但是对于化工生产中回收热能的废热锅炉来说，锅炉内的阻力大小与密封性好坏就成为一个十分重要的问题。尤其当系统的总压降有一定限制的情况下，废热锅炉的结构必须保证气体在通过时，其压降值控制在工艺条件的许可范围之内。否则过大的阻力损失不仅增加了系统的动力消耗，甚至会影响系统的正常生产。在裂解气的急冷过程中，压降过大就使得裂解的选择性恶化，影响产品的收率。这是废热锅炉作为工艺设备直接影响工艺生产的又一体现。因此，对于废热锅炉的压降，通常都有限制值，例如急冷锅炉的压降要求限制在几毫米水柱以内。不少急冷废热锅炉在气流通道中都有一次扩大和二次扩大结构，其目的就是为了减少气体涡流效应而使压降值小些。

废热锅炉密封性要求高，不仅在于工艺气体大多是生产中需要的工艺物料或中间产品，而且往往具有较高压力。特别是某些工艺气体为易燃、易爆或有毒性物料，一旦泄漏不仅物料和能量损耗、环境污染而且也是十分危险的。为此，在废热锅炉的密封结构上应特别注意。一般高压下应尽量减少各种开口尺寸。在高温下，要尽可能减少法兰连接，否则容易发生螺栓蠕变、松弛，密封失效。

三、化工装置对废热锅炉的要求

要求化工装置在生产中能连续地、长周期地稳定操作。化工生产的开车准备阶段往往需要经过预热、升温、升压、以及催化剂活化等过程，时间较长，效率很低。因此在进入稳定生产以后，就希望能有最长的高效生产周期。频繁地开停车不仅影响生产效率，而且也影响装置中的设备寿命。

生产装置的操作周期是由各个设备的使用寿命来保证的。由于废热锅炉往往是整个生产装置中不可分割的一个组成部分，因此废热锅炉能否安全、高效、长周期地运行，直接影响整个装置的运行周期。在某些生产过程中，整个装置操作周期的长短往往主要取决于废热锅炉的使用寿命。因此废热锅炉的安全、长周期运行问题在化工装置中就显得尤为重要。

但是化工生产中的高压废热锅炉，由于操作条件比较苛刻（如高温、高压、热流强度大、结构中的热应力大，流体力学条件比较复杂等），比较容易发生各种事故。尤其当高温工艺气体中含有粉尘、杂质时，更容易造成炉管结焦或堵塞（在火管式锅炉中），或在管壁上覆盖一层热阻很大的垢层（水管式锅炉中）。垢层的累积会使热阻和压降增大，运行周期缩短。这样如果频繁地清理检修废热锅炉，就会使得整个化工生产过程难以稳定地、高效地、连续生产了。

第三节 废热锅炉的事故

近十多年来，美国对大型合成氨装置的停车原因进行了多次调查，其结果表明，影响装置连续运转的主要设备是一段转化炉、废热锅炉和压缩机等大机组。虽然近年来由于废热锅炉结构、材质上有所改进，事故比例有所下降，但仍然是影响生产的一个重要因素。美国在不同时期的调查结果见下表：

表 1-2 各种设备造成装置停车的百分率

	1967 } 22个厂的调查 1970年	1971 } 27个厂的调查 1972年	1975 } 30个厂的调查 1976年
废热锅炉	21%	10%	8%
一段转化炉	19%	17%	13%
压缩机	13%	27%	25%
换热器	10%	9%	11%
其 它	37%	37%	43%

国内近几年来的生产实际也表明,废热锅炉发生的事故是比较频繁的。无论是从美国、日本引进的刺刀管式锅炉或从法国引进的U形管式锅炉都曾先后多次地发生过各种事故。如国内某厂在废热锅炉累计的实际投运不到四个月的时间内,先后发生过三次炉管爆破事故,情况是比较严重的。

综合废热锅炉曾经发生过的各种事故,追其原因大体上可以分为两类:第一类是由于锅炉部件的选材不当、结构不好以及设计上的某些缺陷所造成的,这是由于设计人员对废热锅炉的特点认识不足缺乏经验。在废热锅炉应用的初期,这类问题暴露较多,这些年来已在不断地改进。第二类是由于操作管理上的原因。化工生产中的操作管理人员,通常对于工艺过程中的主要反应设备比较熟悉,也比较重视,往往以其主要精力来抓这一类设备的操作管理,以提高反应的转化率和产品的收率。但是对于废热锅炉往往认识不足,也不够重视,容易把它作为一般性的辅助性设备来对待。对于这种高温高压设备在生产运行中的规律性没有很好地掌握,因此,即使不少锅炉事故在爆发以前,可以从很多异常现象上获得信息,也没有采取必要的措施来加以提防或消除。显然这一类事故是完全可以通过对废热锅炉规律性的掌握而避免产生的。