

国外化工用废热锅炉发展概况

上海科学技术情报研究所

X 701
3.10

国外化工用废热锅炉发展概况

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 2.5 字数: 62,000

1975年6月第1版 1975年6月第1次印刷

印数: 1—4,200

代号: 151634·237 定价: 0.35 元

(只限国内发行)

毛主席语录

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

洋为中用。

前 言

随着我国社会主义建设事业的日益发展, 工业建设的规模不断扩大。为了提高生产效率, 降低生产成本, 能源的综合利用, 具有十分重要的意义。

在能源综合利用方面, 废热锅炉有着显著地位。石油、化工、冶金、发电等工业部门, 越来越多地采用了废热锅炉。化工用废热锅炉, 主要用于合成氨生产、烯烃生产、石油加工及硫酸生产等部门。随着化工装置的大型化, 废热锅炉成了它的一个关键设备, 越来越引起人们的注意。

为了配合技术改造和引进设备翻版, 我们会同上海化工局设计室, 上海机械学院动力系、上海锅炉厂、吴泾化工厂等, 编写了《国外化工用废热锅炉发展概况》一书, 供有关工厂、科研设计单位, 大专院校的工人、干部、科技人员、工农兵学员、教师等参考。在编写过程中, 我们还得到上海四方锅炉厂、上海化工机修总厂、南京化工学院, 兰州石油机械研究所、广东化工学院的支持, 表示感谢。

限于水平, 谬误之处在所难免, 希望大家批评指正。

上海科学技术情报研究所

一九七五年二月

目 录

前言

第一章 概述	1
一、废热锅炉的分类	1
二、化工用废热锅炉的特点	3
三、化工装置大型化趋势	4
四、废热锅炉经济效果分析	5
第二章 国外化工用废热锅炉发展现状	8
一、合成氨用废热锅炉	8
二、石油加工用废热锅炉	11
三、烯烃装置用废热锅炉	14
四、硫酸生产用废热锅炉	15
五、其他化工部门用废热锅炉	16
第三章 国外化工用废热锅炉发展趋势	18
一、大型化	18
二、自动化	19
三、定型化	19
四、结构合理化	22
五、维护简便化	23
第四章 国外化工用废热锅炉的关键问题	24
一、管板	24
二、管子与管板的连接	25
三、热补偿	25
四、高温介质入口部的防护	26
五、密封	26
六、衬里	27
七、汽包	28
八、给水	29
九、腐蚀	30
十、污染	31
十一、故障	31
第五章 国外化工用废热锅炉的选材问题	33
一、出口盘管的选材	33
三、换热器和冷却器的选材	34
三、蒸汽发生器的选材	35
参考文献	36

第一章 概 述

随着装置的大型化,各个工厂都相当重视热能的管理工作,在设计阶段就要考虑到如何提高工厂全部热能的利用率。为了有效地利用废热,必须设置废热锅炉,以便获得用作动力的高压蒸汽或供一般使用的低压蒸汽。

废热锅炉又称工艺热能综合利用锅炉,或者工艺气体冷却器,是由一般的列管热交换器及水管式锅炉之间的结合而发展起来的。

一、废热锅炉的分类

废热锅炉可分为两大类:水管锅炉和火管锅炉^[1,2]。

如果将锅炉水输入传热管内部,而高温气体在传热管外部流过时,称之为水管锅炉。反之称为火管锅炉。

水管锅炉又可进一步细分为自然循环型、强制循环型及非循环型等。其中强制循环型锅炉虽系水管锅炉的一种,但在运转、维护、造价等方面有很多不利因素,用得很少。

根据废热锅炉的安装方法,可分为卧式、立式及斜置式等。如按结构来分,则有浮头式、U形管式、吊桶式、套管式、固定管板式、插入式及其他特殊型式等。

1. 火管锅炉

火管锅炉由火管与管板构成。处理气体在火管内侧流动,而锅炉水则在火管外侧流动。锅炉水由设置在上方的汽包处,通过几根下降管,流向火管锅炉的下端,流贯火管外侧,呈汽水混合物,然后通过上升管,返回汽包。这种类型的锅炉,使用效果一向较好。

火管式废热锅炉,实质上是一种热交换

器,工艺气体流经管内而被冷却^[3]。热量被在管间的蒸发水所吸收。蒸汽与水分离及干燥后,可用于加热、发电或作工艺用汽。蒸汽的发生与分离可在一组装式机组内完成,它类似于一种袖珍式火管锅炉或蒸发器,或同时采用这两种型式。有典型的废热锅炉,其热气体进入衬有保温层的入口槽道及从管子流过。给水加入上汽包,经过外面的下降管后流入工艺气体冷却器中。这些水大约有5~10%蒸发形成水-蒸汽混合物,它由自然热循环而经过外面的上升管回到上汽包中。这是由于在上升管中的水-蒸汽混合物的密度小于下降管中水的密度,因而形成循环力。经过装设在上汽包内部的分离器,将蒸汽从水中分离出来。汽包中的液位控制是为了调节给水,使之维持在稳定的水平上。

许多年来,火管式锅炉特别是船用斯考茨锅炉,一直保留有受浓火猛烈冲击的管板结构,而烟气是由火箱或炉子进入管内的。这种锅炉的燃烧系统,采用一般的煤,或在自然通风下燃油。热交换器的热量很难超过15,000英热单位/小时/平方呎。再者,燃烧系统是比较脏的,金属表面附有数量大小不同的游离绝热层。最后,蒸汽压力很难超过200~225磅/平方吋表压(140.6~142.4公斤/厘米²)。和这种情况相比,现代废热锅炉由于没有显现的火焰,热交换量常常可以超过110,000英热单位/小时/平方呎(进口端)。气体及受热面易于清洁,蒸汽压力能达到1,000磅/平方吋表压,有时亦可达到2,300磅/平方吋表压。但以前,进口侧管板在运行一段时间后会发发生泄漏,因此常常需要采用将套管胀轧在管内以加强的结构,这样由于重复的胀轧,而使管子的端部严重减薄。

2. 水管锅炉

自然循环的水管锅炉, 处理气体在其管外流动, 其管内的锅炉水则形成气水混合物。由于锅炉管及上升管内气水混合物与下降管内锅炉水间产生了密度差, 引起水循环。为了有利于水循环的顺利进行, 汽包应设置在足够高的位置上。

与火管锅炉相比, 这种水管锅炉具有一系列优点, 其一是因其具有大口径壳体, 适合用于高压场合; 其二是由于水循环获得可靠保证, 在传热面上可取得较高的容许热负荷。具体说来, 自然循环水管锅炉具有下列优点:

1) 锅炉管内的气水混物流速高, 可无须担心由于膜沸腾而引起的过热。

2) 管板仅有一块, 锅炉管系 U 型或插入式, 这样可避免由于壳体和锅炉管间的温差而形成的热应力。

3) 汽包容积及配置高度, 与火管锅炉情况差别不大, 但下降管、回流管等口径可以缩小。

4) 管板配置于处理气体的低温方, 不致发生过热。

5) 锅炉水的容量较火管式锅炉小, 在负荷变动时, 汽包中的水位变动不大。

6) 锅炉管的排列较合理, 邻近壳体板的耐火材料及高合金钢衬料都不易烧坏。

7) 管巢可以拔出, 锅炉管的检查修补比较方便。

一般说来, 此类废热锅炉对于日产 600 吨、锅炉压力 70~105 公斤/厘米²的合成氨装置而言十分适用。此外, 还有称为插入式(套管式)锅炉, 亦即锅炉水在内管中下降, 而汽水混合物则在外管与内管间上升, 以此原理制成。

如日本川崎重工制造的合成氨装置用二次重整处理气体的废热锅炉, 压力在 115 公斤/厘米², 蒸汽生成量约 73 吨/小时, 结构的特点在于: 汽包下方的下降管, 自壳体上部起, 即形成双重套管, 贯穿于回流管的内侧, 然后

在耐火材料中下降至壳体末端, 此时再经集流管向水冷壁及对流传热锅炉管分配锅炉水。水冷壁及锅炉管均系单纯上升管, 在壳体上部经上部集流管与套管中的回流管接通。它与上述自然循环锅炉相比, 具有下列优点:

1) 由于未用厚管板, 在管板与锅炉管的连接部分, 法兰部分等处就不会发生泄漏。

2) 单纯上升锅炉管与非加热下降管两者截然分开, 这样水循环可获得可靠保证, 不致因负荷的急剧变化而危及安全。

3) 对流传热锅炉管的最外层排列紧密, 形成水冷壁, 对壳体的耐火材料有保护作用, 这样就无须担心壳体上的过热点问题。而最内层的锅炉管, 同样紧密排列, 可使之形成旁通管。

4) 由于下降管和回流管构成了双重套管, 经热套管相互贯通, 壳体的接合部分就不会发生过大的热应力。

总的说来, 自然循环式水管锅炉的最大优点是: 如果汽包内有充分的水容量, 而且废热锅炉专用的蒸汽压力调节阀装置适当, 则即使发生停电等事故, 或原装置, 废热锅炉的辅机等停止运转, 也不会发生任何故障。

强制循环式水管锅炉, 系经由汽包下来的下降管, 再经锅炉水循环泵, 使锅炉水产生压差, 从而在锅炉中进行循环的一种废热锅炉。其优点大致如下:

1) 由于采用循环泵, 促使锅炉水循环, 锅炉管内的压降幅度较大, 可将小口径锅炉管自由配置, 使之具有易于传热的外形。这样, 废热锅炉的传热面结构非常紧凑, 在壳体内侧极易配置水冷壁, 故如与耐火材料相比, 它可避免发生壳体过热点危险。

2) 锅炉管的口径小, 用于高压比较有利。其次由于锅炉管内的气水混物流速可以增大, 即使在传热面上的容许传热面热负荷较高, 或负荷急剧变化时, 也不致产生循环不良的情况。

3) 汽包配置并无特殊限制, 在循环泵的

净吸入高度值的容许范围内,配置位置可以自由选择。由下降管、回流管等组成的循环水管,其循环水量比自然循环锅炉少,因此只需采用小口径的配管。又因传热面本身的排列方向比较自由,全套装置的配置比较方便。另外由于循环水量少,易于进行汽包内的气水分离,在处理要求获得较高纯度的蒸汽时,十分有利。

4) 锅炉中的水容量少,对负荷的急剧变化较易适应。

5) 由于采用了循环泵,亦极易构成烟道气体废热锅炉。此时所用的循环配管仍可采用小口径管。

强制循环式水管锅炉也存在一些缺点。首先是由于使用了循环泵,当循环泵停止时就有烧坏锅炉管的危险。其次是设备费及运转维修费较大,虽因小口径锅炉管配置紧凑而使设备费用有所降低,但仍不足以弥补上述缺点。为此通常应设置循环泵两台,其中一台备用。

当锅炉压力在 65 公斤/厘米²以下时,循环泵无论采用卧式、单级螺旋式或密封轴封式均无问题。但如超出 85 公斤/厘米²时,则应采用密封式锅炉水循环泵。

二、化工用废热锅炉的特点

化工用废热锅炉的特点,大致有下列六点:① 高温高压,② 急冷,③ 严格控制露点及出口气温,④ 含尘和结垢,⑤ 压降要小,⑥ 密封性好^[45]。

1. 高温高压

在化工和石油化工生产中,一般都在高温高压下操作。例如合成氨生产中重油气化炉后的废热锅炉,进口气温一般为 1,350°C,压力为 32~40 公斤/厘米²。合成氨生产中合成塔前置式废热锅炉的进口气温为 400°C 左右,压力为 320~580 公斤/厘米²。乙烯生产中的裂解气废热锅炉进口温度一般在 820~

900°C。制氢装置用废热锅炉进口温度高达 1,500°C,压力为 80~100 公斤/厘米²。在此条件下,废热锅炉就得采取一系列措施,如选用能耐高温应力和高温腐蚀的材料,寻求高温气体入口冷却保持方法。特别是为了解决锅炉管板的高温热应力,尚需探索合理的结构形式。

2. 急冷

这个特点在原油裂解制取烯烃过程中尤为突出。在此过程中,原油被加热到 820~900°C,并在此温度下进行裂解反应,其速度很快,不到一秒钟就把原油转变为乙烯、丙烯和其他产品。为了尽可能减少不必要的副产品,防止产品质量下降,并减少后续管道系统及设备积垢,需把出口温度在 815°C 以上的高温裂解气急冷到可停止进行裂解反应的温度(454~760°C),其时间最好限在 0.015 秒以下,最多也不能超过 0.03 秒,这样才能达到预期的冷却效果,否则就会产生二次反应和结焦,妨碍生产的顺利进行。为此,对废热锅炉结构的要求十分严格,既要能保证在极短时间内大幅度降温,又要保证气流迅速通过,而且系统的压降要减少到最低限度。

3. 严格控制露点及出口气温

严格控制露点对化工用废热锅炉说来颇为重要。在急冷裂解气的过程中,如将裂解气温度急冷至其中高沸点组份的露点温度以下,则高沸点组份将形成冷凝物,附着于管壁上而成为结焦。如在反应气体中含有腐蚀性气体如一氧化碳、三氧化硫时,有可能形成酸雾,使设备遭到破坏。为此,必须把操作温度严格控制在反应气体的露点之上,此外还要在结构上考虑采取保护措施,如加套管保护装置等。

在化工生产中,温度和压力的变化幅度不能太大,因而所用的废热锅炉必须保证炉气出口温度能满足工艺生产的要求。但做到这一点并不容易,因而不少废热锅炉均带有气温调节装置。当气体出口温度过高时,调节

装置应能使通过传热管的气量增加,以降低气体出口温度;反之,调节装置应使通过传热管的气量减少,以使出口气体温度升高,来保持出口温度稳定。

4. 含尘和结垢

在化工生产中,反应气体中往往含有粉尘杂质,石油裂解气体中则含有炭黑等污物,极易造成锅炉的堵塞及结焦等事故。如硫酸厂沸腾炉的出口炉气中含尘达200克/米³左右,这样不仅因极易复盖在传热面上而使传热效率显著恶化,而且随着气流速度的增大对传热面的冲刷磨蚀也很快,此场合使用的废热锅炉就应十分重视解决粉尘堵塞和冲刷磨蚀的问题。结焦堵塞问题,也是裂解气废热锅炉的一个关键问题。

5. 压降要小

气体通过的压力降,对一般锅炉而言不是个突出问题。但对化工用废热锅炉而言,在系统总压降一定的情况下,锅炉压降成了一个很重要的问题。特别是在对裂解气要求急冷的情况下,气流速度很高,通过设备相应的压降也必然增大,不少急冷废热锅炉在气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,从而减少气流通过设备的压降。因而在气流速度大的情况下,废热锅炉结构必须保证使气流通过时的压降控制在工艺条件许可范围之内。

6. 密封性好

化工用废热锅炉的密封问题,也是设计工作的一大难题。特别是在某些要求严格的场合,更不允许泄漏易燃、易爆或有毒性的气体,为此就要特别注意密封情况。一般在高压下,应尽量减少各种开口尺寸,以便得到较小的法兰连接,因为作用于开孔盖板上的力与开孔直径平方成正比;而在高温下要尽可能减少法兰连接,因为在高温下,特别是在温度超过500°C时,材料强度会急剧下降,这样设计的连接法兰和螺栓必然十分粗大。例如在常温下能承受100公斤/厘米²的法兰连接,

在500°C、22公斤/厘米²压力下就不能使用了。在高温下,螺栓会产生蠕变,停车后发生松弛,且使垫片移动,往往导致密封失效。

三、化工装置的大型化趋势

废热锅炉的采用,和化工装置的大型化有着密切关系。这里简述一下乙烯装置、炼油装置、合成氨装置、尿素装置,甲醇装置的大型化发展趋势。

1. 乙烯装置

装置大型化可降低生产成本,如年产10万吨的乙烯装置,生产一吨乙烯的成本为60美元,而30万吨装置上产生一吨乙烯的成本只有47.5美元。因而大型化趋势十分明显,如六十年代初国外乙烯厂建厂规模一般为5万吨,目前增至30万吨。英国和西德已建成了年产45万吨的乙烯厂,英国路莫斯公司还为墨西哥设计了一套年产50万吨的乙烯装置,原料为乙烷^[46]。英国已建成了年产54.5万吨的乙烯厂。据报道,日本将陆续关闭10万吨以下的乙烯装置。

2. 炼油装置

近年来,大多数新建炼油厂的规模都在450~500万吨以上,最大的是委内瑞拉的阿木奥炼油厂,年生产能力达3,150万吨。

据报道,主要炼油国家炼油厂的平均规模近年来有了很大发展(万吨/年):

	1963 年	1971 年	1972 年
美 国	177	263	253
苏 联	—	~400	—
日 本	219	440	500
西 德	200	370	410
意 大 利	187	462	530
法 国	353	506	641
英 国	312	520	586
委内瑞拉	—	635	625
加 拿 大	119	190	210
荷 兰	—	995	1,300

炼油厂规模扩大后,经济效果比较显著。据苏联报道,炼油能力从 300 万吨增至 600 万吨时,单位投资可节约 31%,钢材节约 47%,占地减少 46%,劳动生产率提高 140%。据美国估算,年处理能力为 100 万吨的炼油厂,每吨原油的平均投资为 190 美元,而 500 万吨炼油厂的这种指标仅为 100 美元。

3. 合成氨装置

国外的合成氨装置,正在建造的最大容量达日产 1,700 吨。以日本为例,自 1957 年合成氨产量超过 100 万吨以来,发展速度很快,1965 年增至 216 万吨,进而完成了第一次合成氨装置大型化计划(日产规模达 500 吨),1969 年 4 月的生产能力达到 314 万吨。

在第一次大型化的基础上,1969 年开始实行第二次大型化,日产能力规定为 1,000 吨,1972 年生产能力增加到 428 万吨,其中日产 500 吨以上大型合成氨装置的生产能力占到 300 万吨以上^[4]。

4. 尿素装置

在六十年代前五年,尿素装置的日生产能力通常为 50~300 吨,但由于受到合成氨装置大型化的影响,在后五年中投产了不少日生产能力达 400~800 吨的大型尿素装置。尿素产量以 1966 年为例约计 1,000 万吨,到 1970 年增至 2,200 万吨,估计 1975 年增至 3,200 万吨。在大型尿素装置方面,1964 年时最大为日产 400 吨,1969 年时最大为 1,500 吨。目前,日产 1,000 吨的装置已列为标准设计。

5. 甲醇装置

甲醇装置的发展方向,与合成氨工业的大型化动向是完全一致的。目前最大的甲醇装置为日产 1,500 吨。生产甲醇的原料一般是石脑油、丁烷、天然气及炼油厂废气。甲醇的合成方法,以前采用高压法,压力在 200 公斤/厘米²以上,温度在 300°C 以上,催化剂为锌铬系。1967 年开始出现了一种低压法,压力在 50 公斤/厘米²左右,温度为 250°C,催

化剂为铜。低压法即使对于大型装置也能发挥其优越性。

四、废热锅炉经济效果分析

国外从五十年代开始,用废热锅炉回收中低压蒸汽作为工艺用汽,目前已有 80~161.7 公斤/厘米²的高压热锅炉。

利用废热可大大提高生产的经济性。耗能工业部门的二次能源之一是工业炉废气的物理热。废气造成的热损失,平炉为 60~70%,加热炉和轧钢均热炉为 55~65%,石油精炼装置为 25~30%,炭黑生产反应器为 15~30% (占入炉总热量的百分比)^[5]。

利用废热的效率取决于一系列因素,其中最重要的是废热锅炉额定功率的利用小时数、温度水平、废热利用范围,废热锅炉基本投资与效率、以及该地区的有关燃料费用。

废热的利用效果,可通过比较废热锅炉中所得蒸汽的计算费用和用他法获得同等数量热能有关的费用来得到。在苏联,废热利用的单位计算费用按下式:

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{H_{\text{пр}} + e_n \cdot K_{\text{пр}}}{Q_{\text{грн}}}$$

确定废热锅炉基本投资时,废热锅炉 KY-125、KY-100、KY-80、KY-60 的 $K_{\text{пр}}$ 作为基础,成为某厂废热锅炉的价格指标。利用少量废热时,建议采用 40,000 米³/小时 (KY-40)、20,000 米³/小时 (KY-20) 的废热锅炉。

废热锅炉 KY-40 的结构和蒸汽参数,不同于 KY-60、KY-80 等,而 KY-20 尚未工业规模投产,所以基本投资是假定的:KY-40 要比 KY-60 少 15%,而 KY-20 比 KY-40 少 15%。这符合大功率废热锅炉费用下降的总趋势,而燃烧产物量减少 20,000 米³/小时。

概算结果,废热锅炉的基本投资为(考虑到安装、建筑部分、堆放、运输及其他费用):

废热锅炉类型 基本投资, 万卢布

KY-125	18.79
KY-100	15.46
KY-80	13.47
KY-60	10.93
KY-40	9.27
KY-20	7.57

年生产费用 H_{yr} 按动力学技术经济计算方法确定。折旧费用根据现行标准为: 设备费用的 8%, 建设费用的 2.8%, 而小修费用占折旧费的 35%。

耗电费用按下式:

$$H_e = d_e n q_{\text{пол}}^{\text{г}} \tau, \text{ 卢布/年,}$$

式中: d_e ——电能费用, 卢布/度,

n ——单位耗能量, 度/大卡,

$q_{\text{пол}}^{\text{г}}$ ——废热锅炉的计算发热值, 大卡/小时,

τ ——废热锅炉额定功率的年利用时数, 小时/年。

计算中设 $d_e = 0.012$ 卢布/度, $n = 36$ 度/大卡; 年工资费用根据在册人数为每台废热锅炉 8,800 卢布。

计算化学净化水费用时, 预计冷凝损失为 25%, 而化学净化水费用为 0.2 卢布/米³。生产费用中未包括燃料费用。其他费用为总生产费用的 10%。普通基本投资效率系数 $s_n = 0.15$ 。

计算年有效废热量 $Q_{\text{пол}}^{\text{г}}$ 时, 废热锅炉效率 $\eta_{\text{к.г}}$ 设等于 0.35 (不考虑废气带走的热损失), 而废热锅炉出口的气体温度 $t_{\text{к}} = 200^\circ\text{C}$ 。计算废热锅炉入口处的气体温度 $t_{\text{г}}$ 为 400、500、600、700、800 $^\circ\text{C}$, 废热锅炉额定功率的利用时数 τ 为 3,000、4,000、5,000、6,000、7,000、8,000 小时/年, 废气流量 $V_{\text{г.г}}$ 为 20,000~125,000 米³/小时。

废热锅炉的废热利用效果, 通过比较利用费用和在所替代装置上制备同样数量同样参数热量的费用来确定, 得知 $3p_{\text{г}}$ 为每吨废热 5~20 卢布, 而净锅炉效率为 $\eta_{\text{н.к}}$ 由 0.7 变至

0.9, 单位基本投资 $K_{\text{н.к}}$ 由 2 变至 8 卢布/大卡。

根据计算结果, 建立了废热利用经济效果的莫诺图。 $q_{\text{пол}}^{\text{г}}$ 按下式确定:

$$q_{\text{пол}}^{\text{г}} = \gamma q_{\text{пол.г.г}}^{\text{г}} + \beta q_{\text{пол.к.г}}^{\text{г}},$$

式中: γ 和 β ——混合物中高炉气和焦气的份额,

$q_{\text{пол.г.г}}^{\text{г}}$, $q_{\text{пол.к.г}}^{\text{г}}$ ——规定 $V_{\text{г.г}}$ 和 $t_{\text{г}}$ 下高炉气和焦气燃烧产物的有效利用废热。

估计电能和化学净化水费用时, 主要采用了差数方法。在大多数方案中, 废热锅炉中的电能费用为操作费用的主要组成部分 (25~60%), 而在一般锅炉中它仅次于燃料费用 (10~20%)。操作费用中化学净化水的费用部分占比例不大, 约为 0.43 卢布/太卡。

例如炉内废气排放量为 60,000 米³/小时, 温度为 500 $^\circ\text{C}$ 。炉子采用天然气。废热锅炉额定功率利用时数 $\tau = 5,000$ 时/年。根据有关数据得, $3p_{\text{г}} = 9.5$ 卢布/每吨利废燃料, $\eta_{\text{н.к}}^{\text{г}} = 0.86$, $K_{\text{н.к}} = 4$ 卢布/大卡。按莫诺图, 在已知值 $V_{\text{г.г}}$, $t_{\text{г}}$ 及 τ 下, 废热锅炉计算费用 $3p_{\text{г}}^{\text{г}} = 2$ 卢布/大卡; 而在规定值 $3p_{\text{г}}$, $\eta_{\text{н.к}}^{\text{г}}$ 及 $K_{\text{н.к}}$ 下, 对照用锅炉的设计费用 $3p_{\text{г}}^{\text{к}} = 3.5$ 卢布/大卡。因此, 废热锅炉的经济效果根据 $3p_{\text{г}}^{\text{к}} - 3p_{\text{г}}^{\text{г}}$ 确定, 即 $3.5 - 2 = 1.5$ 卢布/大卡。

据分析, 在 30 万吨合成氨装置中, 利用放热反应产生的废热, 可分别得到高压、中压、低压蒸汽。高压蒸汽经过背压得到中压蒸汽, 可提供蒸汽转化的工艺用气, 并用以带动天然气压缩机, 空气压缩机, 氨压缩机、二氧化碳压缩机及锅炉给水泵等。这些机泵所用的透平, 大多为冷凝式, 个别为背压式。中压蒸汽经背压所得的低压蒸汽, 用于一般加热和带动小功率机泵。因此在大型合成氨工厂中, 只需增设一台辅助锅炉, 就可达到自给动力甚至还有多余。据计算^[3], 日产 1,000 吨的合成氨装置, 需驱动下列压缩机:

空气压缩机	约 6,000 瓩,
天然气压缩机	约 2,000 瓩,

合成气压缩机 约 18,000 瓩,
冷冻循环压缩机 约 4,000 瓩,
动力需要量约总计 30,000 瓩。这些驱动用的能量完全可从废热中获得。例如一个日产 1,000 吨的合成氨装置, 大约具有下列热量:

① 二段炉后面的工艺气(氢气、一氧化碳、二氧化碳、氮气等)在 30 巴条件下由 950°C 冷却至 350°C , 可得能量 60,000 瓩;

② 上述气体在由 CO 变为 CO_2 后及经过不同的净化过程后, 在约 30 巴时由 400°C 冷却到室温, 并冷凝气体中的水蒸汽, 可得能量 40,000 瓩;

③ 合成氨热量的贮存, 这即是在合成塔以后气体(氢气、氮气、氨)在约 260 巴时由 380°C 冷却至 240°C , 可得能量 25,000 瓩;

④ 冷却由一段转化炉的烟气为大气压力的省煤器的出口温度, 可得能量 30,000 瓩。总共约可得能量 155,000 瓩。

如在 30 万吨乙烯装置中, 利用高温裂解气, 可副产得到 115 公斤/厘米²的蒸汽, 驱动透平, 能满足“三机”所需的全部动力。

又如在炼油厂 240 万吨催化裂化装置中, 从再生器出来的含 6~9% 一氧化碳的尾气, 其温度达 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$, 可从中回收能量 20,000 瓩。

第二章 国外化工用废热锅炉发展现状

从历史来看,废热锅炉是用于冷却工艺气体的。最初用在运行时发生一些低压蒸汽,但后来对这种廉价能量越来越感到兴趣。目前蒸汽压力已提高至 161.7 公斤/厘米²。对废热的利用,不仅局限于低压工艺气体,而且发展到用高压(35.16~161.7 公斤/厘米²表压)、高含氢量(达 50 分子%)、高温(822.2°C 以上)的工艺气体。在较复杂的系统中,目前还安有过热器和供水预热器即省煤器^[7~10]。

化工用废热锅炉,实质上是一种高温高压换热器。废热锅炉的结构形式很多,如在大型合成氨厂中,转化气废热锅炉有插入管式、水冷壁式、U 形管式、卧式火管等。乙烯装置用废热锅炉,就是高温裂解气急冷器。原先采用带椭圆形集流管的双套管换热器,高温裂解气走内管,沸腾水在内外管间的环形空间流动。为了解决高温气体进口端沿管板厚板所产生的温差应力问题,后来改用薄管板加支撑的固定管板换热器结构。高温裂解气走管内,壳侧为沸腾水,出口端仍用厚管

板。但上述两种结构都要停炉后才能进行机械清焦,装置开工率受到影响。而日本三菱的裂解气急冷器,采用盘管来解决运转中对热补偿的要求,且不必停炉清焦,提高了装置开工率。

一、合成氨用废热锅炉

在重油气化法合成氨原料气时,是将重油、氧和水蒸汽,在特殊结构的喷嘴中进行均匀混合,并成雾状喷入反应炉,雾状混合物在反应炉中被高温火焰及炉壁的辐射热所加热,且使油混合物进一步雾化成类似气体。当雾状混合物的温度达到着火温度后,油中的部分碳氢化合物与氧进行燃烧反应,放出大量热量,可使过程温度提高到 1,270~1,480°C。对于这种热量,应尽可能加以回收,特别是以高压蒸汽形式回收。

目前国外合成氨用废热锅炉的安设情况举例如下^[11]:

合成氨厂	废 热 锅 炉 台 数				
	合 计	二段转化后	中温变换后	脱碳后	辅助锅炉台数
日本东洋工程 美国凯洛格公司	4	2(高压)+1(高压)	1(高压)	—	1 ¹⁾
丹麦汤普松 意大利斯纳姆	3	1(高压)	1(中压)	1(低压)	1 ²⁾
法国欧尔坦	1	1(高压)	—	—	1 ³⁾

1) 高压蒸汽: 100~120 公斤/厘米², 过热 480~530°C

2) 中压蒸汽: 40 公斤/厘米², 过热 390°C

3) 低压蒸汽: 2.5~6 公斤/厘米²。

这种废热锅炉的主要参数为:

名 称	日本东洋工程美国凯洛格		丹麦汤普松	意大利斯纳姆	法国欧尔坦
	第一废热锅炉 (二段转化后)	第二废热锅炉 (二段转化后, 与第一串联)	高压蒸汽 废热锅炉	中压废热锅炉	高压废热锅炉
台数	2	1	1	1	1
型式	插入管式	固定管板式火管式	水冷壁式	火管式	U形水管式
换热面积, 米 ²	178	237	10	140	777
压力, 公斤/厘米 ²					
管	105.5(118)	30.6(340)	117(135)	28.3(33)	105(114)
壳	30.9(340)	105.5(118)	30(38)	40(45)	30(19)
温度, °C					
管	314(330)	482~371(593~385)	322	421~270(450)	314(320)
壳	1003~482(1010~593)	314(330)	967~390~340	105~250(260)	975~360(1010)
产汽量, 吨/小时	129.5(45.6%)	27.8(9.8%)	150	19.7	167
介质					
管	水蒸汽	转化气	水蒸汽	转化气	水蒸汽
壳	转化气	水蒸汽	转化气	水蒸汽	转化气
热负荷, 大卡×10 ⁶ /时	43.3 (2台)	8.97	51	12.2	51.6

注: 温度及压力项中, 括号外为操作值, 括号内为设计值。

产汽量项中, 括号内为占总产汽量的百分比

技术特性表:

	壳	程	管	程
设计压力, 公斤/厘米 ²	29		19.23	
操作压力, 公斤/厘米 ²	26		17.5	
设计温度, °C	240		1,015	
操作温度, °C				
进口	225		675	
出口	225		360	
工作介质	锅炉给水		转化气	
热负荷, 大卡/小时	8×10^6			
换热面积, 米 ²	99.5			
管子数量及尺寸, 毫米	18 根撑管, 直径 38×厚度 6.58×管长 3,146 258 根传热管, 直径 38×厚度 3.76×管长 3,176			
管间距, 毫米	55.56			
管子排列形式	等边三角形			
管板材料及厚度, 毫米	A ₃ , 38			

我国有台引进的合成氨转化气用废热锅炉, 利用二段转化炉排出的高温气体的余热来产生水蒸汽, 其技术特性见上表。^[12]

结构系卧式火管型, 采用较新颖的内回路调节装置, 它利用自动控制的球阀和中心火管出口处的间距变化, 来调节从中心火管通过的高温转化气量。当转化气出口温度过

高时, 球阀的开启度自动减小, 使通过中心火管的高温转化气量减少, 从而降低了转化气出口温度, 反之亦然。为了节省不锈钢, 在碳钢传热管的进口端装有不锈刚楔管。为防止壳程锅炉给水直接冲击传热管, 以及使锅炉给水流动均匀, 在水入口处的壳程壳体内焊有挡板。

捷克斯洛伐克有种废热锅炉, 为了回收象氨合成等高温高压下等温反应时产生的热量, 将高压下送来的反应混合物通过一管道, 之后通过反应器的一些催化剂层, 并通过冷凝器和分离器排出。在一些催化剂层间, 布置有液体热交换器, 它们接入蒸汽废热锅炉系统。蒸汽或带液体的蒸汽沿左方支管上升, 提供热量后冷凝和进入右方支管, 而该支管充满有液体。来自一个压缩级的高压管道, 通过平衡盘接至右方支管, 其实现的途径是提高热载体压力。平衡盘位于锅炉内热载体水平之上, 而其中温度总是低于该压力下的热载体沸点。球形阀的作用是调节催化剂层的热交换情况^[13]。与此相似的另一种废热锅炉^[14], 其中平衡盘用差动活塞来代替。活塞宽广部分下的空间同热载体连接, 而狭窄部分上的空间同反应混合物高压段连接。活塞的相对尺寸取决于反应混合物和热载体的压力比。由于热载体的供送或排出, 活塞保持在中间位置上。活塞的两边都装有阀门, 这样可防止介质在一边降压时产生移动。

据捷专利报道^[15], 废热锅炉的蒸汽过热器, 位于锅炉和燃烧室之间的接头上。接头由接至圆盘的锅炉管组成。所形成锥体的内表面, 复有耐火粘土衬。在水平层炉衬上, 安有带隔离片的蒸汽过热器用蛇管。过热器用蛇管构成了用圆板封住的单段环形构件。燃烧产物通过由接头壁和板形成的环。蛇管分别接至两个集合盘上, 以便供送饱和蒸汽, 且排出过热蒸汽。该两盘位于由壳体隔开的空间内接头之外。蒸汽过热器可由若干个区段组成, 其水平位置的蛇管具有独立的集合盘。

在合成氨时高压装置中进行等温反应时会放出高热值的能量, 它通常在壳管式换热器中用于加热原料气体混合物, 以保证过程的自热性。此时蒸汽发生器安在反应器内, 由于壳体壁厚增加, 反应器的单位金属用量有所增加。为此, 英国研究把废热锅炉装在反应器外面, 并用两根管子同反应器连接, 通

过该两管将加热气体供送或排出。锅炉做成圆柱形器皿状, 其内安有用集流管连接的蛇管。管间空间充满沸腾水。所发生的水蒸汽, 由容器通过分离大水滴用的分离器排出。为了比较均匀地在蒸汽发生器中布置换热管, 其端部往集流管的焊接处, 交替沿圆周相对移动 90° 。所有蛇管均为 M 形, 以使温度易于传递^[16]。

最近, 英国为了供送来自高压反应器的高温气体, 研制成功了一种水管锅炉^[17]。在该废热锅炉中, 上面的被加热管插入壳套, 而该壳套同右面接头的连接, 用于供送高温气体。位于右面接头对面的管子部分, 用圆柱形挡板围住, 该挡板把气流传成两部分, 一部分沿管垂直向上, 一部分则向下。壳套和锅炉壳体间的环形空间, 用隔板分成两个腔。废气通过左面两接头排出。这种结构的优点在于, 气体可于较低温度下送至两个腔, 因而可在左面两接头上安装普通调节阀, 用于调节通过锅炉上下部的加热气体, 以及减少管板厚度。

瑞士苏尔寿型废热锅炉, 用于天然气制合成氨的二段转化炉后面, 用以冷却转化气, 系一种比较特殊的蛇管结构。每根蛇管分为两部分, 上部为供水预热段, 下部为蒸发段。过热部分也可用同样方式安排。对于饱和蒸汽的锅炉, 每根蛇管的出口蒸汽含水量约为 3%, 这些蒸汽汇集于壳体顶部的集管, 然后进入分离器。从分离器出来的水, 一部分引回供水槽, 其余部分排放掉。分离器中的液位控制和汽包锅炉一样。过热蒸汽锅炉不需要高压的水分离器。这种结构的优点大致有:

- ① 管子在壳体内可以得到合理安排, 而不必考虑重力。所有管子都能受热。除了蒸发段而外, 预热段和过热都可以调节。
- ② 由于水一次通过锅炉过程中几乎全部可被汽化, 所以穿过压力壳体的渗透是很少的。
- ③ 由于在所有操作条件下的质量流量高, 管子可获可靠冷却。
- ④ 在受压壳体内部, 水和蒸汽的受

压构件均由断面小,形状简单的构成组成,故在加工方面可以比较精致,检验要求也可比较严格,同时可大大避免温差应力。⑤ 整个管束可从壳体中取出,蛇管的夹持构件是不固定的,以便使蛇管的各个部位都易于检查和清洗。因为管子具有足够的柔性,可允许清洗器在两个蛇管之间通过。据称这是压力气体加热的水管锅炉中能有效清洗的唯一形式。⑥ 此种锅炉没有汽包和下降管,与其他锅炉相比,壳体直径也很小,因此造价较低。

苏尔寿公司还有种合成气废热锅炉,用于冷却合成氨的合成气。它是一台产生中压饱和蒸汽的自然循环锅炉。结构非常简单,无需任何厚管板。它利用几组 U 型双套管与气体的进出口集管及一个汽包相联,高温高压合成气由汽包上部的气体集管进入内管,由上往下,再返回向上流至汽包下方的出口集管,汇总流出。冷却水自汽包下降管通过内外套管之间的环隙下降,受热汽化上升至汽包。内壳管的外壁可用翅片使之在套管中定位。该废热锅炉的合成气压力约为 231 大气压,进口温度为 353°C,出口温度为 263°C,合成气废热锅炉给水压力约 41 大气压,给水量为每小时 49.5 吨。

二、石油加工用废热锅炉

在石油加工厂中,催化裂化和制氢及加氢装置等,都采用了废热锅炉,以回收这些过程中放出的大量废热。

澳大利亚研究了催化裂化装置中催化剂再生器后的废热利用方法以及与此相应的废热锅炉^[18]。催化剂再生器中出来的废气含 5~15% 一氧化碳,其余为二氧化碳和氮气及水蒸汽。该法规定分两步补充燃烧一氧化碳,因而提高了烟气温度。它进入对流式废热锅炉,并将热量通过蛇管形废热锅炉送至原料烃中。

英国有种燃烧低热值气体的装置,把粉

末催化剂沸腾层再生器中出来的气体,沿具有水封和闸板的管子送入废热锅炉的燃烧室。与此管连接的第二个水封安在烟管的下部,在燃烧室中燃烧低热值气体时生成的烟气由此排入大气。第二个水封可防止低热值气体在废热锅炉工作时排入烟管。如务必把低热值气体直接排入烟管时,则从闸板放出液体,并在气体送至燃烧室的线路上关闭闸板^[19]。

美国比较系统地研究了石油加工厂废热的利用^[20]。用作燃料的是催化裂化、热裂解、接触焦化等过程中放出的残余气体。这些气体的温度高,含有可燃成分如一氧化碳,而且是在再生粉状催化剂时生成的。再生气体中含有:CO₂ 7.0 体积%,CO 6.0 体积%,O₂ 1.0 体积%,N₂ 60.0 体积%,H₂O 26.0 体积%。据称,大型催化裂化装置工作时,沸腾层中可生成上述成分的气体每小时 360 吨。这种废热锅炉的结构要求大体如下:① 停修之间的连接工作时间不少于石油催化裂化用设备的寿命,即两年左右;② 在不同种燃料时,可在剩余压力下工作,特别是在启动时;③ 能耐尘状催化剂(由沸腾层再生器中同烟气一起带出)的侵蚀。

美国有种燃烧催化裂化装置再生器中生成的低热值气体的废热锅炉^[21]。烃类蒸汽和空气分别由两根管子送入循环管,并同再生催化剂一起送至反应器,于此分解重质烃类。失活的催化剂沿另一管送入再生器,再生器中还由另一管送入焙烧焦炭所必需的空气。在蒸汽-空气混合物或空气上升流作用下,催化剂处于假液化状态。由再生器出来的烟气,含有大量一氧化碳,且含有少量氢。这种气体在送入锥形底下部的补充空气条件下燃烧。为了改进传热传质过程,燃烧低热值气体的过程是在惰性粉状材料沸腾层中进行的。该层内的温度,用水冷蛇管调节。加热的水由此蛇管送入蒸汽发生器的管束中,而该管束位于低热值气体燃烧区的上面。美国

还有一种石油裂解用废热锅炉^[22]，是将再生催化剂时生成的低热值气体，通过同催化裂化装置再生器连接的管子进入燃烧室。燃烧一氧化碳和其他可燃物所必需的空气，通过一孔送至低热值气流。燃料-空气混合物在一室内逆时针运动，并在二次空气流中燃烧。为了保持稳定的低热值气体燃烧过程，通过喷嘴往燃烧室送入高热值燃料，而它在另一补充空气流中燃烧。燃烧室稳定工作制度的建立，也是由于烟气的强烈混合，及其同加热至高温的耐火炉衬接触。烟气通过热交换器的管间空间，于此依靠把热量传递给水或其他物质而冷却。

在英国，对于裂解石油用工业装置的再生器中生成的大量低热值一氧化碳，一般放在工厂场地上就地制造的废热锅炉的燃烧室中燃烧，但这样生产的废热锅炉并不总能利用现代工艺方法，以及能控制装置的制造质量。为此，美国有公司提出把废热锅炉放在机器制造厂中制造，并向建设工地供应安装时接合起来的组装件。根据美国的铁路运输情况，规定这种组装件的最大尺寸，高度不超过4.2米，宽度不超过3.2米^[23]。

据报道，英国已在成批生产这种废热锅炉及其组装件^[24]。例如有只用于在粉状催化剂沸腾层中裂解石油的废热锅炉，在假液化层中再生催化剂时，生成有大量一氧化碳。在大功率装置上燃烧该气体，是放在固定式废热锅炉的燃烧室中进行的，于此每小时可获水蒸汽100~200吨，压力为42大气压。工业中运行的许多中等功率的装置，如采用普通废热锅炉则效率不高。改用这种废热锅炉后，效率将有显著提高。这种废热锅炉包括燃烧室、蒸汽发生器，水预热器外，还有标准块组装件及配套零件。

根据美国专利报道^[25]，在废热锅炉卧式圆柱形蒸发部分（主要是壳体）中布置有U形管束，沿此通过热载体。该废热锅炉仅安有一个管板，而在另一端用普通的支撑支持

管子。整个主要壳体的管间空隙处都充满水，以用于制备水蒸汽。在上部中间，壳体的壁厚较大，其上还有孔，以便把蒸汽引入立式圆柱形汽包，而汽包直接焊至主要壳体。蒸汽-空气混合物进入汽包的中心腔，且由此通过若干个带防尘罩的旋风离尘干燥塔。被捕集的水同送来的饮水一起，由汽包的环形腔沿主要壳体周边孔流至围住管束的刷子上，且降至底部。这种水不同所上升的蒸汽-水混合物混合，从而加强了自然循环。带汽包的复合锅炉，其特点在于紧凑性，这样就可将其安装好，用作现场使用的废热锅炉。

英国威士顿港有台石油加工用废热锅炉，约重八吨^[26]。它由两种肋条加强的管子组成，即带有冲制圆柱形轴环以及普通孔（用于公盈配管）的铝肋条。管子和肋条孔间的机械接触，可在第二种肋条加强情况下，由于肋条套在管子外径上的螺旋槽而达到。用第一种肋条加强的管子，可有效地用至120°C；而用第二种肋条加强的管子，可有效地用至400°C。热交换器的管子用集流管连接，而集流管去掉位于管子对而的管塞后，可净化管子内表面。为了减少管子的弯曲和振动，规定安有支柱，每隔1.8米管长一根。热交换表而用热空气吹洗，采用带铸造铝叶片的轴流通风机。叶片转动的最大线速度不超过60米/秒。此种速度可获低噪音，而噪音在继续增加速度时迅速提高。在风动控制装置帮助下，某些通风机叶片的迎风角可自动改变，因而改变了废热锅炉的气量及热负荷。通风机转速为每分钟380转，靠电动机用皮带传动，电动机转速为每分钟1,450转。

英国有种废热锅炉，用于冷却高温加工石油时产生的、用作可燃气体的气态产物^[27]。石油产品的加工放在安于高温炉内的管形构件中进行。每一构件都做成两个定心管形状，在管间空间装有催化剂。液态石油产品自动流至催化剂，且气化，而所生成的气体通过内管的敞开下端排至集流管。集流管就连接一