



废热锅炉

维修手册

冯殿义 李晓东 等编

FEIRE GUOLU
WEIXIU SHOUC



化学工业出版社



废热锅炉 维修手册

冯殿义 李晓东 等编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地介绍了废热锅炉的结构、失效形式、检查与维修、运行维护等内容,同时也介绍了一些指导性的维修理论,并列举了生产中的事故与维修实例。

本书可供从事废热锅炉制造、安装、维护与检修及操作的工程技术人员使用,也可供高等院校的有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

废热锅炉维修手册 /冯殿义,
学工业出版社, 2009.5
ISBN 978-7-122-04952-0

I. 废… II. ①冯…②李… III. 废热锅炉-维修-手册 IV. TK229.92-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 026293 号

责任编辑: 辛 田
责任校对: 吴 静

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 17½ 字数 400 千字 2009 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究



前言



生产工艺用废热锅炉除了回收生产过程的余热外，还担负着工艺介质的温度控制任务。近年来，随着生产技术的发展，废热锅炉趋向高参数化，尤其是动力系统引入化工生产以后，废热锅炉由单纯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，同时化工生产用废热锅炉工作在高温、高压、介质腐蚀等苛刻条件下，加之受力、结构和流体流动的复杂性，使其成为整个生产装置中事故的多发设备。这就对废热锅炉安装、调试、维护、检修和管理提出了更高的要求，以保证化工生产持续满负荷运行，从而达到安全、经济运行的目的。

本书对废热锅炉的结构、失效形式、检验与维修和运行维护进行了详尽的论述，并列举了生产中事故及维修实例。由于废热锅炉形式繁多、构造各异，不能一一列举，因此，本书主要介绍化工生产用典型废热锅炉，以使读者举一反三，参照应用于实际。

本书由辽宁工业大学冯殿义和辽宁石油化工职业技术学院李晓东等编写。参加编写的还有李玉庚、范佳、张玉成、冯驰等。全书由冯殿义统稿。

感谢李卫民教授、仪登丽老师对本书的认真审核。本书在编写过程中，得到全国同行和有关专家的大力支持，在此表示衷心的感谢。

废热锅炉的运行、维护与维修是一门技术，需要不断地摸索和积累经验，使其不断完善。由于编写人员水平有限，书中难免存在不足，恳请广大读者批评指正。

编者



第 1 章 概述

1.1 废热锅炉应用与特点	1
1.1.1 废热锅炉及应用	1
1.1.2 废热锅炉的组成与工作原理	1
1.1.3 石油化工用废热锅炉的特点	2
1.2 废热锅炉类型	3
1.3 废热锅炉的发展趋势	5
1.4 废热锅炉的主要事故形式	6
1.4.1 废热锅炉事故的主要原因	6
1.4.2 废热锅炉的主要事故形式	7

第 2 章 废热锅炉的结构特点

2.1 列管式废热锅炉	8
2.1.1 普通列管式废热锅炉	8
2.1.2 带膨胀节列管式废热锅炉	11
2.1.3 内置弹性管箱列管式废热锅炉	14
2.1.4 新型管板列管式废热锅炉	14
2.2 刺刀管式废热锅炉	18
2.2.1 刺刀管式废热锅炉基本特点	18
2.2.2 典型刺刀管式废热锅炉结构	19
2.3 U形管式废热锅炉	26
2.3.1 U形管式废热锅炉基本特点	26
2.3.2 典型 U形管废热锅炉结构	26
2.4 双套管式废热锅炉	34
2.4.1 椭圆形集流管双套管式废热锅炉	34
2.4.2 螺旋形蒸发管双套管式废热锅炉	37
2.5 挠性管式废热锅炉	39
2.5.1 螺旋管式废热锅炉	40
2.5.2 挠性直管式废热锅炉	43
2.6 直流式废热锅炉	44

2.7	烟道式废热锅炉	45
2.8	废热锅炉局部结构特点	46
2.8.1	管板结构	46
2.8.2	炉管与管板的连接结构	48
2.8.3	管板与壳体的连接结构	50
2.8.4	隔热保护结构	51
2.8.5	高温工艺气体入口分布器	57
2.8.6	U形膨胀节	61
2.8.7	高温高压管箱法兰与密封	63
2.8.8	汽包结构	66

第 3 章 废热锅炉传热与工艺气出口温度

3.1	废热锅炉的传热与生产能力	68
3.1.1	废热锅炉的传热能力	68
3.1.2	废热锅炉的生产能力	69
3.2	废热锅炉工艺气排气温度要求	69
3.3	污垢特性与工艺气允许温升	70
3.3.1	废热锅炉污垢热阻特性	70
3.3.2	高温工艺气出口温度随污垢的变化规律	72
3.3.3	废热锅炉出口工艺气允许温升	73
3.4	废热锅炉工艺气酸露点温度	73
3.4.1	工艺气酸露点温度计算方法	73
3.4.2	露点温度计算实例	74
3.5	乙烯裂解废热锅炉排气温度	75
3.6	废热锅炉排气温度的调节	76
3.6.1	中心连通管调节	76
3.6.2	副线与旁路调节	77
3.6.3	汽包压力调节	78
3.7	废热锅炉排气温度异常事故案例	78
3.7.1	废热锅炉排气温度过高案例	78
3.7.2	废热锅炉低温露点腐蚀	80

第 4 章 废热锅炉水循环

4.1	垂直炉管内流型	82
4.1.1	垂直炉管内沸腾状态与流型	82
4.1.2	沸腾危机与临界热负荷	83

4.2 自然循环	83
4.2.1 自然循环原理	83
4.2.2 循环速度与循环倍率	85
4.2.3 循环阻力	85
4.3 结构对水循环的影响	86
4.3.1 刺刀管式结构水循环特点	86
4.3.2 U形管结构水循环特点	88
4.4 刺刀管废热锅炉逆向循环	90
4.4.1 逆向循环产生的原因	90
4.4.2 逆向循环的危害	91
4.4.3 逆向循环的判断	91
4.4.4 逆循环的防止与纠正	93
4.5 水循环事故案例分析	94
4.5.1 刺刀管废热锅炉逆循环事故案例	94
4.5.2 U形管废热锅炉水循环事故案例	96

第 5 章 废热锅炉热应力

5.1 废热锅炉热应力产生的原因	98
5.2 稳定热应力	99
5.3 热应力条件下强度条件	100
5.4 非稳定热应力	101
5.4.1 热冲击与热疲劳	101
5.4.2 热循环与热疲劳	102
5.5 废热锅炉升温要求	102
5.5.1 汽包上的应力状态	103
5.5.2 汽包升压曲线	103
5.5.3 温差控制曲线	104
5.6 废热锅炉热应力事故案例	105
5.6.1 稳定热应力与热疲劳案例	105
5.6.2 热冲击案例	105

第 6 章 废热锅炉水质

6.1 水质不良的危害	107
6.2 水质控制指标	108
6.3 水处理	109
6.3.1 水处理方法	109

6.3.2 分析项目与要求	110
6.4 水质标准	111
6.5 废热锅炉水质不良引起事故案例	115
6.5.1 废热锅炉炉管吸氧腐蚀案例	115
6.5.2 刺刀管帽垢下腐蚀案例	117

第 7 章 废热锅炉典型失效形式

7.1 进口管板与管口烧损	119
7.1.1 进口管板与管口烧损原因	119
7.1.2 进口管板与管口烧损案例	119
7.2 内漏	120
7.2.1 内泄漏发生时的现象	120
7.2.2 炉管与管板连接失效	121
7.2.3 爆管	121
7.2.4 废热锅炉内漏失效案例	123
7.3 超温爆管	124
7.3.1 高温条件下金属金相组织特点	124
7.3.2 超温的两种形式及影响	126
7.3.3 超温爆管断口特征	126
7.3.4 超温爆管案例	129
7.4 锅炉腐蚀	130
7.4.1 金属腐蚀的基本原理	130
7.4.2 腐蚀破坏的形式	131
7.4.3 废热锅炉气侧腐蚀	134
7.4.4 废热锅炉水侧腐蚀	136
7.4.5 腐蚀失效案例	139
7.5 密封失效	141
7.5.1 密封失效原因	141
7.5.2 密封失效案例	142

第 8 章 废热锅炉维修技术

8.1 废热锅炉检修内容与准备	143
8.1.1 废热锅炉检修安全与规程	143
8.1.2 废热锅炉检验、检修周期与检查维修内容	144
8.1.3 检修前准备	146
8.1.4 运行维护与检修安全注意事项	147

8.2	受压壳体的检查与维修	148
8.2.1	受压壳体及封头检查	148
8.2.2	壳体修复要求	149
8.2.3	壳体补焊	150
8.2.4	补焊后的检查	153
8.2.5	废热锅炉壳体检修案例	153
8.3	法兰密封检查与维修	154
8.3.1	法兰密封检查与密封面修复	154
8.3.2	密封垫更换	155
8.3.3	法兰拆装	155
8.3.4	法兰维修案例	156
8.4	汽包内件检查与维修	158
8.4.1	汽包检验周期与检查内容	158
8.4.2	汽包检修周期与检修内容	159
8.4.3	汽包内件拆装、检查与清洗	160
8.4.4	汽包内构件检修	161
8.5	管束的检查与维修	162
8.5.1	管束检查内容	162
8.5.2	管束焊缝检验与查漏	162
8.5.3	补胀与补焊	163
8.5.4	堵管	164
8.5.5	换管	165
8.5.6	管板的维修	178
8.5.7	管束整体维修	179
8.5.8	废热锅炉管束检修案例	180
8.6	隔热保护衬里、衬管检查与维修	189
8.6.1	耐热金属衬套检查与维修	189
8.6.2	耐火混凝土衬里检查与维修	190
8.6.3	隔热衬里检修案例	196
8.7	废热锅炉附件检查与检修	199
8.7.1	气体分布器检查与维修	199
8.7.2	膨胀节检查与维修	200
8.7.3	水位计检查与维修	200
8.7.4	安全阀检查与维修	204
8.8	废热锅炉清洗	210
8.8.1	机械清洗	210
8.8.2	水力清洗	211
8.8.3	吹灰振打	214
8.8.4	喷砂	215

8.8.5	化学清洗	215
8.8.6	废热锅炉清洗案例	218
8.9	压力试验	223
8.9.1	试压方案制订与准备	223
8.9.2	试压方法与要求	224
8.9.3	检查内容与合格标准	225
8.9.4	安全技术措施	225
8.9.5	废热锅炉水压试验规程实例	226

第 9 章 废热锅炉运行故障原因与处理

9.1	废热锅炉工艺气出口温度过高偏低	231
9.1.1	工艺气出口温度过高	231
9.1.2	工艺气出口温度偏低	232
9.2	水位失常	232
9.2.1	缺水原因与处理	232
9.2.2	满水原因与处理	233
9.2.3	水位不明原因与处理	234
9.3	超压	234
9.4	蒸汽带水	234
9.5	汽水共腾	235
9.6	水循环不正常	235
9.7	气道堵塞与结焦	236
9.8	隔热防护衬里损坏与壳体局部超温	236
9.8.1	隔热防护衬里损坏	236
9.8.2	壳体局部超温	236
9.9	其他故障	237
9.9.1	蒸汽管内水击原因与处理方法	237
9.9.2	给水管内水击原因与处理方法	237

第 10 章 废热锅炉运行与维护

10.1	运行前准备	238
10.1.1	运行前检查	238
10.1.2	开车准备	239
10.1.3	煮炉	239
10.2	废热锅炉的开车	240
10.2.1	系统注水	240

10.2.2	升温	240
10.2.3	汽包磁化	241
10.3	停车	241
10.3.1	正常停车与事故停车	241
10.3.2	停车后保护	242
10.4	废热锅炉运行时维护	244
10.4.1	运行时监控与调节任务	244
10.4.2	炉水的监控与调节	245
10.4.3	工艺气的监控与调节	246
10.4.4	蒸汽的监控与调节	247
附录 1	凯洛格 (Kellogg) 合成氨工艺第一废热锅炉主要参数	249
附录 2	凯洛格 (Kellogg) 合成氨工艺第二废热锅炉主要参数	253
附录 3	美国布朗 (BL) 公司合成氨工艺合成第一废热锅炉主要参数	254
附录 4	美国布朗 (BL) 公司合成氨工艺合成第二废热锅炉主要参数	255
附录 5	美国布朗 (BL) 合成氨工艺二段转化炉废热锅炉主要参数	256
附录 6	法国赫尔蒂 (Heurtey) 合成氨工艺废热锅炉参数	258
附录 7	伍德 (UHDE) 公司合成氨工艺合成气废热锅炉参数	260
附录 8	斯密特型废热锅炉	263
附录 9	焊接材料及焊后热处理温度选用	265
	参考文献	267

第 1 章 概述

1.1 废热锅炉应用与特点

1.1.1 废热锅炉及应用

废热锅炉又称余热锅炉，是指那些利用工业过程中的余热来生产蒸汽的锅炉。废热锅炉主要应用于化工生产过程中，用来冷却高温工艺气体，控制工艺气体温度，并生产动力蒸汽，广泛应用于合成氨工业、乙烯工业、硫酸工业、硝酸工业等石油化工生产工艺过程中。目前在冶金、机械、造纸、玻璃搪瓷、建材等行业的余热回收中，废热锅炉也得到普遍的应用。

废热锅炉用来控制工艺气的温度，同时又回收生产过程的余热生产蒸汽，有完整的水循环系统，这有别于一般的换热器。由于废热锅炉高温、高压及介质的特殊性，使其成为整个生产装置中的事故多发设备，其原因除设计本身缺欠外，主要是安装、维修、管理及操作不当引起的。生产单位技术人员更多地关注反应设备，而将废热锅炉看作是生产辅助设备，未能引起足够的重视。随着生产技术的发展，废热锅炉趋向高参数化，尤其当动力系统引入化工生产以后，废热锅炉由单纯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。如德国的伍德（Uhde）公司、波尔西格（Borsig）公司，丹麦的托普索（HTAS）公司，美国的凯洛格（Kellogg）公司、布朗（Braun）公司等设计的废热锅炉可副产高压蒸汽，这种高压蒸汽在日产 1000t 以上能力的合成氨企业中，多用于驱动合成原料气及合成循环气的透平压缩机。因此，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。

1.1.2 废热锅炉的组成与工作原理

废热锅炉由锅炉本体、汽包、循环系统及辅助设备等组成，其中锅炉本体是一个具有一定传热表面的换热设备。尽管实际使用中的废热锅炉有各种各样不同的结构形式，但其工作原理基本相同。下面以列管式废热锅炉为例，介绍废热锅炉的组成与工作原理。其他类型的废热锅炉工作原理与其类似，只是在某些局部结构上有所区别，以适应不同的操作条件。

列管式废热锅炉本体实际上是一种固定管板的列管式换热器，包括管板、封头、壳



体、换热管或管束等部件。图 1-1 为水平列管式废热锅炉系统，属火管式锅炉，即管内为高温工艺气流，壳程为汽、水混合物。汽水侧与外部汽包相连通，利用上升管与下降管中介质的密度差构成自然循环，故属于自然循环式废热锅炉。列管式废热锅炉工作原理如图 1-2 所示。

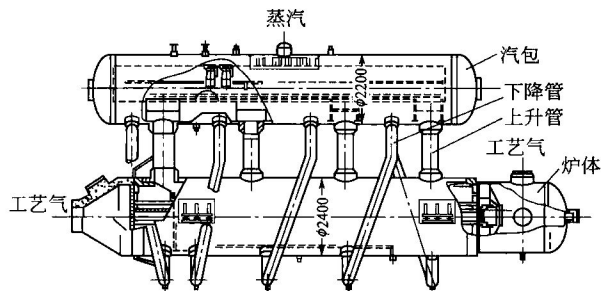


图 1-1 水平列管式废热锅炉系统

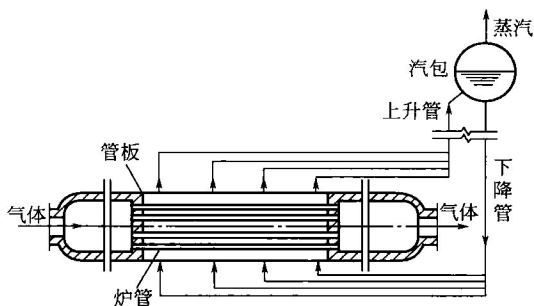


图 1-2 列管式废热锅炉工作原理示意图

1.1.3 石油化工用废热锅炉的特点

化工生产用废热锅炉不仅是一台动力设备，而且是整个化工装置中的一台工艺设备。因此，必须满足生产工艺过程的特殊要求。化工生产过程对废热锅炉的要求主要是由高温、高压工艺气体的特殊性所决定的，主要表现在以下几个方面。

(1) 高温、高压

化工生产用废热锅炉热源的介质通常是高温高压的工艺气体。如以天然气为原料的合成氨生产中，二段转化气废热锅炉进口工艺气温度为 $900 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，压力为 $3.0 \sim 3.5\text{MPa}$ ；乙烯生产中的裂解气废热锅炉进口工艺气温度为 $820 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ，压力为 $7.8 \sim 13.7\text{MPa}$ ；在制氢装置中使用的废热锅炉进口工艺气温度达 1500°C ，压力为 $7.8 \sim 9.8\text{MPa}$ 。

高温高压的操作条件对废热锅炉的运行和维护提出一些特殊的要求，如需要解决隔热防护、高温热应力、高温腐蚀等问题。

(2) 控制高温工艺气体出口温度

化工生产用废热锅炉作为化工装置中的一种关键工艺设备，其主要作用之一是用来控



制工艺气体的温度。因此,废热锅炉高温工艺气出口温度取决于后继生产工艺的要求。同时工艺气出口温度也会影响锅炉运行的安全性。温度过高,可能会引起炉管金属超温事故;对于含有腐蚀性组分的气体,温度过低(低于工艺气体的露点温度),则可能会因析出酸雾而引起锅炉腐蚀。

因此,在一些废热锅炉中设有温度调节装置,以在温度波动工况维持出口温度恒定。如带中心调节管废热锅炉、带旁路调节废热锅炉等,都是通过改变流经换热管束的高温工艺气体的量来调节工艺气出口温度。

(3) 冷却速度

在化工生产过程中,有时不仅需要控制废热锅炉高温工艺气出口温度,而且还要控制工艺气的冷却速度。因为工艺气在废热锅炉中的冷却速度有时会影响其组成和结焦情况。如乙烯装置中的废热锅炉,裂解炉出口气体温度达 815°C 以上,要求在 0.05s 时间内急速冷却到 $450\sim 500^{\circ}\text{C}$ (裂解气反应基本终止的温度),否则高温裂解气体不仅会发生二次反应,降低乙烯的收率,而且还会在炉管上结焦,严重时还会引发局部超温过热,甚至爆管事故。因此乙烯装置裂解炉废热锅炉的主要作用是使高温裂解气体急速冷却。

(4) 低压降

废热锅炉的压力降值要求控制在工艺条件允许的范围内。主要有三个方面的原因:一是阻力降的高低直接影响到生产装置的能耗水平,使动力消耗增加;二是压力降的大小对生产工艺的影响,如在裂解气的急冷过程中,压降过大会使裂解的选择性恶化;三是对于自然水循环系统,水汽侧循环回路的阻力大小,直接影响到水循环的好坏,进而影响传热表面的传热效果,从而影响受热炉管的使用寿命。因此,一些废热锅炉在气流通道中设有一次扩大和二次扩大结构,其目的之一是减小气体涡流效应,而使压力降值降低。

(5) 运行周期长

化工生产用废热锅炉作为化工生产过程中的一个重要的工艺环节,同时还兼作生产中的动力装置,用来生产驱动其他化工机器的动力蒸汽。其运行的安全和可靠性直接影响着整个装置的生产周期。因此,要求废热锅炉能够安全、稳定、长周期地运行。

(6) 维修方便

由于化工生产用废热锅炉工作在高温、高压、介质腐蚀的苛刻条件下,加之受力、结构和流体流动的复杂性,当工艺气体含有粉尘、杂质时,还容易造成炉管的结焦或堵塞,使其成为整个生产装置中事故的多发设备。因此,要求废热锅炉在结构上便于维护与修理。

1.2 废热锅炉类型

废热锅炉中进行的是热量传递过程,因此,废热锅炉的基本结构是一个具有一定传热表面的高温高压换热设备。由于石油化工用废热锅炉的各种工艺条件、对工艺气冷却要求及生产蒸汽的要求差别很大,因此,化工生产用废热锅炉的结构类型也是多种多样的,以适应不同生产过程的需要。按不同的分类方法,常见的有下面几种类型。



(1) 按使用场合分类

按使用场合分类主要有合成氨装置中二段转化炉变换气废热锅炉、氨合成气废热锅炉、乙烯装置裂解气急冷废热锅炉、重油汽化废热锅炉、甲烷-氢转化气废热锅炉、硝酸工业中的氧化炉出口废热锅炉、硫酸工业废热锅炉及冶金中的余热锅炉等。

(2) 按炉管内流动介质分类

按炉管内流动介质分类主要有水管式与火管式废热锅炉两类。

水管式锅炉管内是饱和水和水蒸气，管外是高温工艺气。由于炉管直径很小，管内可以承受较高压力，因此，水管式锅炉适用于蒸汽压力高、蒸发量大的场合。

火管式锅炉管内是高温工艺气体，管外是饱和水和水蒸气。这种锅炉的特点是高温气体容易均匀地分布到各炉管中，气体停留时间较短，管外水侧的流体阻力较小。但是火管式锅炉的蒸汽压力过高，直径过大，壳体承受应力大，因此，这种锅炉蒸发空间较小，产汽量也受到限制。火管式锅炉管内气侧清洗和炉管维修方便；如果水中带有不溶性渣粒通常都沉积在壳体上，对传热效果影响较小，因此，对水质的要求较水管式低。

(3) 按安装方式分类

按安装方式分类主要有卧式和立式废热锅炉两类。

卧式锅炉炉管水平放置。这类废热锅炉大都采用火管式，因此，管内清扫灰垢、炉管维修方便，而且结构也比较简单。但是这种锅炉的蒸发量小，蒸汽压力低，水侧循环速度慢，传热速率也较低。通常用于中小型废热锅炉。

立式锅炉炉管垂直放置，通常比卧式锅炉水循环速度快，传热速率较高，蒸汽空间较大，因此，这种锅炉蒸发量大。在大型化工装置中，当回收热量较多、蒸汽压力较高时，通常采用立式水管锅炉。

(4) 按汽水循环系统特性分类

按汽水循环系统特性分类主要有自然循环式和强制循环式废热锅炉两类。

自然循环式废热锅炉水循环，是由下降管和上升管之间的流体密度差产生的循环推动力实现的。水气的循环不需要另外设置循环泵，循环比较可靠。但循环速度不能调整。

强制循环式废热锅炉水循环，是依靠外部的循环泵产生的循环推动力实现的。强制循环的循环速度可以按需要调整，但是在锅炉运行期间，泵消耗能源，而且容易由于泵的故障而影响水循环。化工生产用废热锅炉较多采用自然循环式。

(5) 按锅炉操作压力分类

根据我国《压力容器安全技术监察规程》的规定，废热锅炉和其他压力容器一样，分为低压、中压和高压三大类。

低压废热锅炉 $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$ ；

中压废热锅炉 $1.6\text{MPa} \leq p < 10.0\text{MPa}$ ；

高压废热锅炉 $10.0\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$ 。

目前化工生产用废热锅炉，多为生产高压动力蒸汽的高压废热锅炉。

(6) 按结构特点分类

按结构特点可分为管壳式和烟道式废热锅炉两类。其中管壳式废热锅炉应用较为



广泛。

烟道式废热锅炉与一般燃烧锅炉的烟道部分结构类似，高温气体通过非金属材料砌成的烟道、设置在烟道中的管束与水冷壁进行换热产生蒸汽，回收高温烟气的热量。

管壳式废热锅炉与管壳式换热器相似，是通过高温工艺气与锅内的水进行间壁换热，产生蒸汽，实现对高温工艺气体的冷却和温度调节，并生产蒸汽。管壳式废热锅炉按结构特点又可分为以下几种类型。

① 列管式废热锅炉，包括普通列管式废热锅炉、带膨胀节列管式废热锅炉、内置弹性管箱列管式废热锅炉、新型管板列管式废热锅炉。

② 刺刀管式废热锅炉，又称插入式废热锅炉。其中包括单管插入式废热锅炉、管束插入式废热锅炉和倒置插入式废热锅炉。

③ 挠性管式废热锅炉，其中包括螺旋盘管式废热锅炉、挠性直管式废热锅炉和 U 形管式废热锅炉等。

④ 双套管式废热锅炉，其中包括椭圆形集流管板双套管式急冷废热锅炉、螺旋形蒸发管双套管式急冷废热锅炉。

⑤ 直流式废热锅炉。

⑥ 填料函式废热锅炉。

1.3 废热锅炉的发展趋势

(1) 大型化

火管废热锅炉，过去公认为适用于处理化工过程中的高温工艺气。随着工艺改革和化工装置大型化的迅速发展，生产过程需要处理为数众多的高温高压工艺气，而在蒸汽利用方面又要求提高废热锅炉的运行压力，这样，火管废热锅炉原来具有的一些特征，如结构简单、操作方便、造价低廉等已逐渐消失。

由于装置大型化，如目前合成氨装置日生产能力已趋于 1000~1700t，锅炉的压力上升到 10.0MPa 以上；而且高温部分工艺气体的配管要力求简单，最好在一系列的装置上只设置一台废热锅炉。这样，无论在技术上还是在经济上，火管锅炉都非常不利，目前的趋势是逐渐改用各种类型的水管锅炉。经验表明，自然循环水管锅炉对日生产能力在 600t 以上、废热锅炉压力在 7.0~10.5MPa 的合成氨装置是十分适用的。此外，还有插入式和套管式锅炉，即利用炉水在内管中下降、汽水混合物在外管与内管间环形通道中上升的办法制作的各種废热锅炉。

(2) 自动化

化工用废热锅炉近年来在自动化方面发展很快，其目的是通过采用最新发展的阀件及控制仪表，达到自动化操作。

(3) 定型化

随着化工、冶金及电力工业的发展，越来越多的废热锅炉研制成功，为了适应这种情况，国外普遍重视废热锅炉的定型化。

在废热锅炉的设计和制作方面，日本的废热锅炉标准较完善。日本劳动省颁布了“锅



炉及压力容器安全规则”、“锅炉构造规格”、“压力容器构造规格”等，日本规格协会制订了“JISB8243 非用火容器构造”、“JISB8249 一般化学工业用多管圆筒形热交换器”等。美国有机械工程师学会的“ASME 标准”及管式换热器制造协会的“TEMA 标准”等。

(4) 结构合理化

目前，在高温高压下，采用管壳式换热方式的趋向有所增加，尽管在某些场合下仍在使用其他结构形式，如蛇管或套管等结构，但由于蛇管传热效率低，结构笨重，处理量小；而套管单位换热面的金属消耗量大，制造成本高，处理量也较小，它们都不能适应现代石油化工企业装置向大型化方向发展的需要。因此在高温高压场合，广泛采用管壳式换热设备。例如在石油炼厂加氢裂解装置中的管壳式换热设备，其操作压力已达到 24.5MPa。在某些合成氨厂中，压力为 32.4MPa 的高压气体，已用管壳式换热器来冷却，不再用套管式冷却器。

高温高压废热锅炉的结构日趋合理化。尤其是管式换热设备用于核动力高压水系统和强制循环的高压给水器以来，对其结构进行了大量的研究，其通常包括固定管板式、U 形管式和浮头式三种形式。

(5) 便于维修与维护

近年来，由于种种原因，废热锅炉往往会产生严重事故。由于工艺气体的温度及压力越来越高，导致这种设备的机械设计越来越困难。由于废热锅炉事故的易发性，要求废热锅炉的结构设计便于检查、维护与维修。

1.4 废热锅炉的主要事故形式

1.4.1 废热锅炉事故的主要原因

废热锅炉是化工生产装置中的事故多发设备之一。虽然近年来废热锅炉结构、材质有所改进，事故比例有所下降，但仍然是影响整个装置运行的一个重要因素。国内近几年的生产实际也表明，无论是从美国、日本、法国、德国等引进的废热锅炉，还是我国自主研制和生产的废热锅炉，都先后多次发生过各种比较严重的事故。综合分析，其主要原因有三个方面。

① 由于锅炉部件的选材不当、结构以及设计上的某些缺陷造成。这是因为设计人员对废热锅炉的特点认知不足、缺乏经验。这类问题多暴露在废热锅炉应用的初期，近年来虽然得到不断的改进，但仍然出现由于设备本身缺陷而引发的事故。

② 由于安装、维修不当造成。设备安装、维修施工人员没有充分了解和掌握废热锅炉的特点及其结构的特殊性，在没有充分理解图纸及施工要求的情况下进行施工及改进，或没有严格按照安装和维修规程进行施工，导致运行时出现事故。

③ 由于操作、维护和管理不当。化工生产中的操作管理人员，通常对工艺过程中的主要反应设备比较熟悉和重视，往往将废热锅炉作为装置中的一般性的辅助性设备来对待，对其认识不足或重视不够，没有很好地掌握这种特殊的高温高压设备的运行规律，因此，虽然许多锅炉事故在爆发以前已出现很多异常现象，但这些信息没有及时发现或受到