

# 补燃式余热锅炉

陈起铎 周渭镛 (哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕 介绍已研制成功的炼油厂补燃式余热锅炉的结构设计和性能特点。锅炉采用新形式,应用新结构,重量尺寸小,经济效益高,是节能省钢的先进产品,具有广阔的应用前景。

关键词 余热锅炉 补燃 结构设计

## 1 前 言

余热锅炉作为节能的主要设备,在我国正在获得广泛的应用。然而,具补燃装置的余热锅炉在国内尚属鲜见。本文所述的大型补燃式余热锅炉已成功应用一年多,此余热锅炉蒸汽参数高,容量大,具有外置补燃燃烧室。无疑,此锅炉的研制成功,将为大型补燃式余热锅炉在我国的推广应用展示出良好的前景。

## 2 锅炉工作原理

本余热锅炉应用于60万吨/年催化裂化炼油装置余热回收系统,锅炉型式为双锅筒纵置式具有外置补燃燃烧室以及过热器和省煤器的自然循环水管锅炉。锅炉工作原理如图所示。

余热锅炉装置由补燃室和余热锅炉本体两大部件组成。来自炼油装置的再生余热烟气经烟气轮机进入余热锅炉本体之前,与来自补燃室的高温烟气相混合。混合烟气进入余热锅炉本体之后,依次流经对流过热器、蒸发管束和省煤器,最后排出烟囱,进入大气。

补燃室采用人造瓦斯补燃。补燃室内壁两侧布置辐射式过热器,用于使蒸汽二次过热,达到所要求的蒸汽参数。余热锅炉本体仅对饱和蒸汽进行一次加热,用以产生低过热度的过热蒸汽。

给水流经省煤器加热之后,分为两路:一路引入锅炉上锅筒内;另一路引至锅外系统加热汽化。锅炉内生成的饱和蒸汽,与锅外系统生成的饱和蒸汽,一起引入对流过热器和辐射过热器,加热生成过热蒸汽。

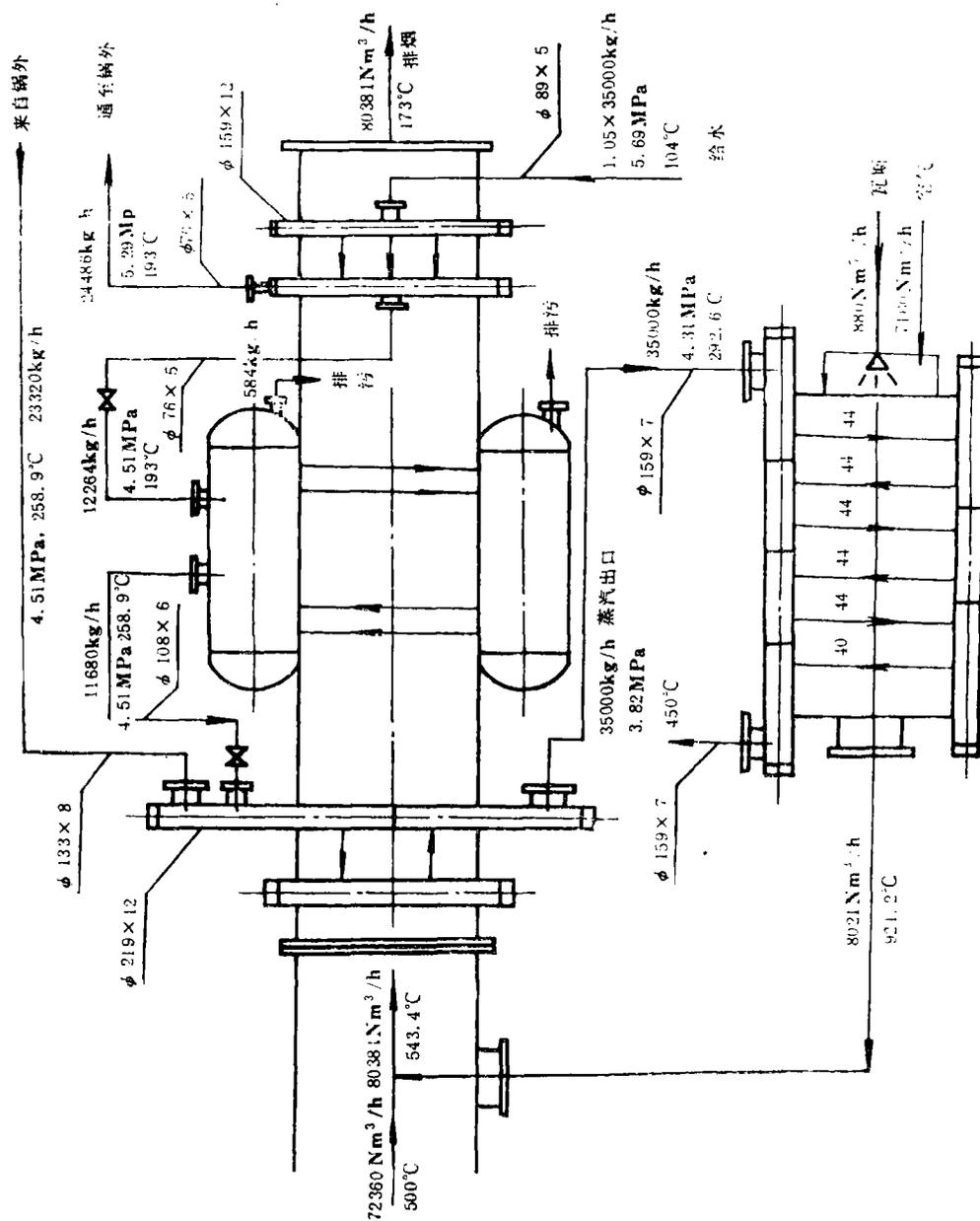
## 3 锅炉主要特性

锅炉主要特性见表1。

## 4 兼作过热器的补燃室

本余热锅炉不但需要将锅炉本体生成之蒸汽过热,而且也需要将外来的、数量更多的蒸汽过热。这是余热利用系统总体设计的要求,仅设置对流过热器不能达此目的。因此,进行补燃,由外界加入热量,便成为必不可少的手段。

补燃的方式可以是内补燃,也可以是外补燃,鉴于再生余热烟气的含氧量只有



补燃式余热锅炉工作原理图

表 1

锅 炉 主 要 特 性

序 号	名 称	单 位	余热烟气温度	
			$\theta_1 = 500^\circ\text{C}$	$\theta_1 = 650^\circ\text{C}$
1	上锅筒工作压力	MPa	4.51	4.51
2	过热蒸气压力	MPa	3.82	3.82
3	过热蒸汽产量	kg/h	35 000	35 000
4	过热蒸汽温度	$^\circ\text{C}$	$450_{-20}^{+15}$	$450_{-20}^{+15}$
5	余热锅炉蒸汽产量	kg/h	11 680	16 872
6	锅外引入蒸汽产量	kg/h	23 320	18 128
7	锅炉排污量	%	5	5
8	给水温度	$^\circ\text{C}$	104	104
9	余热烟气温度	$^\circ\text{C}$	500	650
10	余热烟气流量	$\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$	72 360	72 360
11	补燃燃料		瓦斯	瓦斯
12	补燃燃料发热值	$\text{kJ}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$	29 684	29 684
13	补燃燃料消耗量	$\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$	880	690
14	补燃空气温度	$^\circ\text{C}$	20	20
15	补燃室出口烟温	$^\circ\text{C}$	921.2	832.5
16	补燃室烟气流量	$\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$	8 021	6 290
17	余热锅炉进口烟气总流量	$\text{N}\cdot\text{m}^3/\text{h}$	80 381	78 650
18	余热锅炉进口实际烟温	$^\circ\text{C}$	543.4	664.8
19	锅炉内烟气阻力	Pa	3 116	3 156
20	过热蒸汽阻力	MPa	0.605 2	0.667 1
21	锅炉排烟温度	$^\circ\text{C}$	173	177
22	余热锅炉本体受热面	$\text{m}^2$	1 540.48	
23	补燃室辐射受热面	$\text{m}^2$	48.68	
24	余热锅炉装置总受热面	$\text{m}^2$	1589	
25	余热锅炉装置金属重量	t	106	
26	余热锅炉装置总重量	t	110	
27	余热锅炉装置总尺寸	mm	15 000 × 10 000 × 10 000	

3.1%，内补燃行不通，唯一途径只能是外补燃。

计算分析表明，设计兼作过热器的外补燃室最为有利。补燃室布置辐射式过热器，有利于提高传热效果，减少受热面积，降低重量尺寸。反之，如果补燃室布置蒸发受热面，不但需要设计庞大的对流过热器，而且更为不利的是，补燃燃料量将大幅度增加。这显然是用户所不希望的。

本补燃室辐射式过热器设计成双集箱立式受热面。此一结构见诸船舶锅炉中具有单独炉膛的辐射式过热器，陆上尚不多见。其

特点是结构简单，吊挂方便，制造容易，停止运行时水易放干；同时具有较大的炉膛横截面，可以布置较多的燃烧器，扩大燃料调节范围。

补燃室上下集箱为 $\phi 219 \times 12$ ，受热面管子为 $\phi 32 \times 3.5$ ，材料均为 12Cr1MoV。管子成密排布置，管间节距  $S = 35 \text{ mm}$ ，总共 260 根，两侧各有 130 根。为保证受热面积工作可靠，应使蒸汽重量流速达到  $w \geq 450 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。为此，管子分为 6 个流程，第 1 至第 5 流程均为 44 根，第 6 流程为 40 根。两侧管子上

下均与焊在集箱上的四排短管相连接,使集箱既受密集管束保护,又有较大的强度减弱系数。上下集箱均采用良好的绝热保护措施,可使集箱免受烟气直接辐射。

燃烧器布置于补燃室前墙,由平流式喷燃器和调风器所组成。本设计布置两个燃烧器,运行时除采用调节进气阀开度和进气压力来调节补燃量外,还可以用关闭燃烧器的方法来调节补燃量。通过调节补燃量,可以调节过热蒸汽温度,适应锅炉及外界系统的负荷变化。

补燃室产生的烟气由补燃室后墙引出。

补燃室按有关规定布置有看火门、人孔门和防爆装置。

## 5 对流过热器

对流过热器用于加热锅内外的全部饱和蒸汽,使之生成一定过热度的过热蒸汽。本余热锅炉因省煤器加热的给水量大,受热面多,排烟温度易满足节能要求,对流过热器受热面不必布置过多。但为降低补燃室辐射过热器热负荷,减少补燃燃料量,对流过热器受热面又不宜布置过少。因此,对流过热器设计应当恰到好处,既不必使用复杂的结构、昂贵的管材,又能布置工作可靠、简单有效的受热面。

经过选型、计算和结构设计,对流过热器布置成双集箱立式环管受热面。此为船舶锅炉过热器典型结构之一,在船舶锅炉中不乏应用实例,但在陆上却长期无人问津。其特点是结构简单,制造方便,只需装设管束定位板,不必装设承受载荷的复杂支吊装置,并且在停止运行时水能放干,工作特别安全可靠。缺点是管排数受集箱上焊接工艺的限制不能布置太多,通常是顺列布置三排,错列布置四排。在一定的受热面下,立式环管结构远优越于陆上传统的双集箱倒置立式蛇形管受热面。

集箱采用  $\phi 219 \times 12$ , 受热面采用  $\phi 32 \times 3$ , 材料均为20号碳钢锅炉钢管。管子顺列布置,横向节距  $s_1 = 60 \text{ mm}$ , 平均纵向节距  $s_2 = 112 \text{ mm}$ , 每排32根,共6排,分成两个流程,先逆流后顺流。受热面管直接与集箱焊接。

1982年我所首次将立式环管过热器应用于前郭炼油厂余热锅炉,之后又多次应用于其它余热锅炉、工业锅炉及本余热锅炉,无不运行可靠,管理方便,应用成功,实际上已完成此型过热器由船用向陆用的移植。无疑,这是一种值得推荐的陆用过热器新形式。

## 6 蒸发管束

6.1 蒸发管束是余热锅炉的主要受热面,锅炉重量尺寸指标的优劣,主要取决于蒸发管束的设计布置上。

本设计蒸发管束布置成双锅筒纵置式,烟气沿锅筒纵向中心线横向冲刷受热面。上下锅筒水平中心线距离为5700 mm。上锅筒内径为1200 mm,下锅筒内径为1100 mm,厚度均为60 mm。上下锅筒封头厚度均为46 mm。筒身和封头材料均为20 g。受热面采用  $\phi 38 \times 3$  管子,材料为20号碳钢锅炉钢管。顺列布置,横向平均节距  $s_1 = 62 \text{ mm}$ ,纵向节距  $s_2 = 78 \text{ mm}$ ,每排30根,共46排。受热面管与上下锅筒采用胀接连接。

6.2 上述结构参数具有如下明显特点:

6.2.1 管径小,传热好,有利于降低锅炉重量尺寸。工业锅炉和余热锅炉传统推荐采用的管径为51 mm。笔者以为这只适合于给水品质和水循环条件较差的情况之下。通常对设置过热器的锅炉,给水品质较好,则不应照抄照搬,而应视具体情况,具体分析,灵活采用。我所设计的余热锅炉管径多为42 mm或38 mm,运行多年从未见管内积垢烧坏或发生水循环事故。而管径从51 mm减小

至38 mm, 传热系数提高20%, 再加上管束结构紧凑, 锅炉的重量尺寸大为降低。

**6.2.2** 受热面横向节距  $s_1$  小, 同样受热而下, 管束总排数少, 烟气阻力低, 受热面更为紧凑, 锅炉重量尺寸更加降低。传统推荐采用的管间传热横向节距为  $s_1 \geq (2 \sim 2.5)d$ 。这对燃煤锅炉是否适合尚待商榷, 对燃油锅炉, 特别是对燃油余热锅炉, 就更不合理。根据国外船舶锅炉资料介绍, 对燃煤锅炉, 可取  $s_1 \geq d + 20 \text{ mm}$ ; 对燃油锅炉, 可取  $s_1 \geq d + 15 \text{ mm}$ 。某些国外资料甚至认为, 燃油锅炉的管距比  $\frac{s_1}{d}$  只要满足  $1.25 \leq \frac{s_1}{d} \leq 2$  和

$s_1 \geq d + 13 \text{ mm}$  即可。

基于上述观点, 我们采用较小管径  $d = 38 \text{ mm}$  及较小的平均横向节距  $s_1 = 62 \text{ mm}$  (为方便安装, 个别管子管间可按不等节距布置)。取得比较满意的效果。

## 7 省煤器

本余热锅炉省煤器除为锅炉本体加热给水外, 还要为锅炉外系统加热数量更多的给水, 因此其受热面相当庞大, 其结构设计不可等闲视之。

由于受热面大, 如按常规布置于直立烟道上, 其结构尺寸必然很高, 不但管束支撑装置及构架设计较为困难, 而且尾部受热面屡次发生的振动问题也必然更加突出。为此, 在本设计中, 省煤器采用立式集箱卧式蛇形管结构, 布置于水平烟道。集箱为  $\phi 159 \times 12$ , 受热面为  $\phi 32 \times 3.5$ , 均为20号碳钢锅炉钢管。受热面顺列布置, 横向节距  $s_1 = 52 \text{ mm}$ , 纵向节距  $s_2 = 82.35 \text{ mm}$ , 每排61根, 总共54排, 分成三组, 每组18排, 工质一次逆流流动。

在水平烟道内采用立式集箱卧式蛇形管结构, 是受到船舶锅炉过热器类似结构的启示, 陆上至今未见应用先例。水平烟道省煤

器实际应用较少, 人们研究不多, 在锅炉专业的著作中几乎没有提及。余热锅炉中偶有应用, 但采用的是卧式集箱结构, 各并列平行管束的工作条件不一, 传热、水动力等热工特性不佳, 弊端甚多, 实不足取。而本余热锅炉省煤器采用立式集箱结构, 经设计和运行实践表明, 它符合基本工作原理, 布置方便, 工作可靠, 传热优良, 完全适用于水平烟道。毫无疑问, 本省煤器的成功问世, 将为锅炉省煤器增加新的型式, 使省煤器无论是在直立烟道, 或是在水平烟道, 都可以按需布置, 运行自如。

## 8 烟气温焓的计算

补燃式余热锅炉烟气温焓的计算与普通锅炉有所区别。计算步骤如下:

**8.1** 根据余热烟气的成分, 计算相应于各种温度的余热烟气热焓值, 编制余热烟气温焓表;

**8.2** 根据补燃燃料的成分, 计算相应于各种温度的补燃燃料生成烟气焓值, 编制补燃烟气温焓表;

**8.3** 根据设计任务和总体布置方案, 计算补燃燃料耗量及补燃燃料生成烟气每小时容积流量;

**8.4** 根据余热烟气的每小时容积流量和补燃燃料生成烟气的每小时容积流量, 计算相应于各种温度的混合烟气热焓值, 编制混合烟气温焓表。主要计算公式为

$$I = \frac{V_1 I_1 + V_2 I_2}{V_1 + V_2} \text{ kJ}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$$

式中

$I$ ——某一温度下混合烟气的热焓,  $\text{kJ}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ ;

$I_1$ ——同一温度下余热烟气的热焓,  $\text{kJ}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ ;

$I_2$ ——同一温度下补燃烟气的热焓,  $\text{kJ}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ ;

$V_1$ ——标准状况下余热烟气每小时容积流量,  $N \cdot m^3/h$ ,

$V_2$ ——标准状况下补燃烟气每小时容积流量,  $N \cdot m^3/h$ 。

### 9 锅炉性能特点

综上所述, 本余热锅炉具有如下主要性能特点:

**9.1 重量尺寸小。**本余热锅炉金属总重量为 106 吨, 只有国内同类型锅炉重量的 69%。

**9.2 排烟温度低。**本余热锅炉按单压中参数设计, 锅炉设计排油温度为  $173^\circ C$ , 实际运行排烟温度为  $150^\circ C$ , 余热能源利用的经济性高。

**9.3 锅炉各主要部件型式新颖, 结构独特, 有所创新, 有所突破。**补燃室、对流过热器、蒸发管束、省煤器等部件的设计, 并不拘泥于传统的结构模式, 而是博采众长, 融合船用锅炉和陆用锅炉两方面的先进经验, 使之特色纷呈, 风格各异。这是本余热锅炉设计上所以获得成功的根本原因。

**9.4 补燃燃料量调节范围较广, 适应锅炉及系统负荷变化的能力强。**

**9.5 锅炉工作安全可靠, 操作简单, 运行管理方便。**

### 10 结 论

1. 本炼油厂大型补燃室余热锅炉业已研制成功, 其重量尺寸和经济性指标二者兼优, 可在炼油厂类似工程上应用, 也可在其他工业部门推广。

2. 本余热锅炉补燃室、对流过热器、蒸发管束、省煤器的结构型式, 无不开创陆上应用先例。它以舰船长期使用经验为基础, 设计合理, 运行可靠, 各种工业锅炉、余热锅炉均可参考借鉴。

3. 减小锅炉管径和管束管间节距是降低锅炉重量尺寸的重要途径。应当从锅炉设计、制造、安装、运行诸方面, 探讨进一步减小管径和管间节距的可能性。

### 参 考 文 献

- 1 清华大学热能工程教研室. 锅炉原理及计算. 科学出版社, 1985
- 2 陈学俊、陈听宽. 锅炉原理. 机械工业出版社. 1979

(李乡复 编辑)

## Supplementary fired Waste Heat Boiler

Chen Qiduo, Zhou Weigao

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

### Abstract

A supplementary-fired waste heat boiler for use in oil refineries has been successfully developed. This paper gives a detailed description of its structural design and performance features. Of a new type and novel construction characterized by a low weight and small size, the said boiler pertains to a technically advanced product which has enormous application potentialities because of its high cost-effectiveness resulting from significant steel and energy savings.

**Key words:** waste heat boiler, supplementary firing, structural design