

# 直流型余热锅炉的设计

王 钧 国学斌 刘时林 (哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔提要〕用于双工质平行——复合循环的直流型余热锅炉，属国内首台。本文对其设计方法、以及煮洗锅炉和水质要求等进行了叙述，为进一步试验研究和运行提供了条件。

主题词 余热锅炉 设计

## 前 言

在双工质平行——复合循环研究中，余热锅炉是整个装置中的主要设备之一。它利用燃气轮机的排气余热产生过热蒸汽，将蒸汽回注入燃气轮机的燃烧室中。本文讨论了国内第一台小容量的直流型余热锅炉在设计方面的一些问题。

## 一、方案选择

在方案设计中，对比了自然循环式、强制循环式和直流式三种基本方案。自然循环式的尺寸大；强制循环需一外置式汽水分离器及循环泵，同时还要增加进口集箱尺寸。

其重量和尺寸均超过了直流式；直流锅炉重量轻，尺寸最小，金属耗量小（见表1）。虽然直流式余热锅炉的水质要求高于自然循环和强制循环。但本设计系低压直流式锅炉，采用除盐水加除氧，用普通电厂水处理的方法即可。在比较各种方案的优缺点、考虑试验装置的特定要求后，选择了直流式余热锅炉。

方案选择时，考虑了其结构特性的设计不仅和热工特性、空气动力特性有关，还要考虑到工厂的制造工艺。例如，选取管径为 $\phi 29 \times 3$ 的螺旋圈片管，其尺寸、重量和金属耗量小于用 $\phi 38 \times 3$ 的管子，但考虑到工厂加工的可能，最终仍选取了 $\phi 38 \times 3$ 的螺旋圈片管。

表 1 三个方案尺寸、重量比较

类别 \ 锅炉 型式	直 流 式	强 制 循 环 式	自 然 循 环 式
锅炉尺寸 (mm) (长×宽×高)	3100×1739×4115	3100×1739×1415加—1000×3200 外置式汽包	3100×87 ×4500
本体重量 (kg)	1413	2574	3736
锅炉尺寸 (长×宽×高) (mm)	3200×1760×2123	3200×4359×5712	3200×2070×5230
总体重量 (kg)	3480	4469	5661

收稿日期：1989-07-23

横向节距、有效计算长度和横向排数的增减决定烟气流通截面积的大小，从而决定烟速的高低。烟速高，则传热系数大，所需传热面积小，烟气阻力增加，就使燃气轮机排气背压上升。一般认为余热锅炉的阻力在 2.45~2.94 kPa 之间，排气压力每上升 1.25kPa，该燃气轮机油耗率增加1%，故本锅炉的烟速应在 15~20m/s 之间。此直流式余热锅炉过热器烟速为 18m/s，蒸发段烟速为 15m/s，预热段为 13m/s，锅炉总烟气阻力在上述推荐范围内。

方案选择过程中，还要考虑立式和卧式布置对其管排的横向节距和纵向节距的影响。就立式而言，烟气和工质的走向在各段受热面均可布置成逆流式、在横向和纵向节距保持传热状态较佳情况下选定。小容量余热锅炉，采用卧式布置时，当预热段管内水速不能达到 0.3m/s，甚至采用一根管子作为水的流通截面，其流速亦不能达到时，则必须考虑水的流向向上。在保证横向节距的情况下，调整纵向节距，使之满足这一条件。而烟气和工质的流向，不能保持逆流而成混合流。对蒸发段，由于汽包的上升浮力，其汽水混合物的走向应保持向上。若向下，则要求更高的流速，一般应大于 0.5m/s。工质流通截面小，阻力大，泵的耗功亦多，不经济。本锅炉根据总体布置的紧凑性，采用卧式方案，其结构布置如图 1 所示。这台锅炉为单烟道式，受热面均选用  $\phi 38 \times 3$  螺旋圈片管错排布置，材料为 20# 锅炉钢管。烟气由过热器入口至预热段出口，给水由泵泵入预热段，以单根管子由小弯头折转串联，由下至上入预热段出口集箱上部。集箱垂直布置，水在集箱中由上向下引至集箱下部，以单管引出，由弯头折转串联，由下至上入蒸发段出口集箱，汽水混合物的走向及集箱管子的连接如上述，直至过渡段引入出口集箱上部，集箱亦垂直布置，微过热蒸汽向下引至集箱中部，分两根管子引出，各

自占烟道上、下各半，由小弯头折转串联，和烟气成逆流入过热器出口集箱，集箱横向布置，过热蒸汽由主蒸汽管引出。

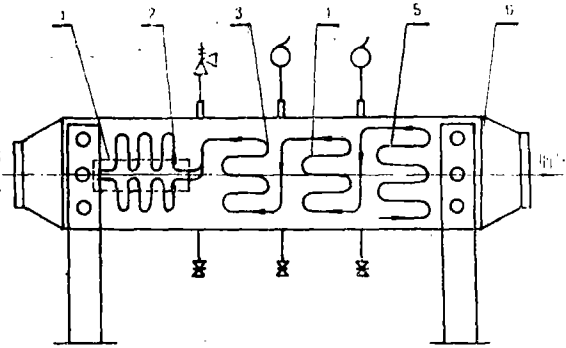


图 1

- 1. 过热器出口集箱    2. 过热段    3. 过渡段
- 4. 蒸发段            5. 预热段    6. 箱体

### 二、参数的确定

由燃气轮机提供的锅炉入口参数为：

$$G_y = 6341 \text{ kg/h}; \theta = 443^\circ\text{C}$$

余热锅炉的参数为：  $p = 1.03 \text{ MPa}$ ，  $t =$

$$413^\circ\text{C}; t_{gs} = 20^\circ\text{C}$$

在给定  $G_y$ 、 $\theta$ 、 $p$ 、 $t$  和  $t_{gs}$  的情况下，蒸汽产量  $D$  取决于饱和蒸汽出口处的烟气温度与饱和蒸汽温度之差  $\Delta t_2$ 。此值取定，蒸汽产量则定，且排烟温度亦定。而且， $\Delta t_2$  的大

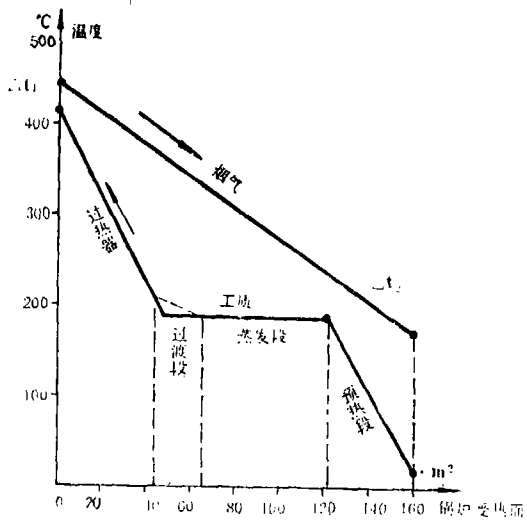


图 2 锅炉介质温度变化图

小还决定受热面的大小。一般文献推荐,此值为20~30℃。对本锅炉,因 $\theta-t = \Delta t_1 = 30^\circ\text{C}$ ,若节点温差 $\Delta t_2$ 在此范围内,则受热面较大,但在已定的空间较小的情况下已无法布置下去。如图2所示的温流图所得的余热锅炉受热面较小,所得到的蒸汽产量 $D = 570\text{kg/h}$ 。在计算蒸汽产量时,应考虑蒸汽注入燃气轮机后,余热锅炉的入口气体流量、温度及物性也均随之而变的特点。

### 三、螺旋圈片管排的传热计算

在螺旋圈片管内的传热计算中,烟侧螺旋圈片管的对流放热系数 $\alpha_1$ 的计算较为复杂,这是因为其几何特性,制造工艺水平,介质物性等因素的影响。对螺旋圈片管错排

布置的管束,在美、英等国广泛采用Briggs and young®公式计算:

$$\alpha_1 = 0.134 \frac{\lambda}{d} \left( \frac{dw}{v} \right)^{0.631} \cdot p_r^{\frac{1}{3}} \left( \frac{s_1}{l_q} \right)^{0.2} \cdot \left( \frac{s_1}{\delta_q} \right)^{0.1134} \quad (1)$$

此公式适用于6排以上,因6排以上管排数对烟侧的放热系数影响很小。而在4排以内则必须修正。尽管如此,此式并不能完全包括螺旋圈片管的所有情况;忽略管排结构和管间节距的影响也是不完善的。将此式乘以系数 $\phi$ ,得圆圈片管排的计算值,与联合标准圆圈片管公式\*作了比较,其计算曲线如图3所示,且把杭州锅炉研究所做的试验数据亦示于曲线上,则可知其误差,应进一步作研究工作,以得到较精确的应用计算公式。

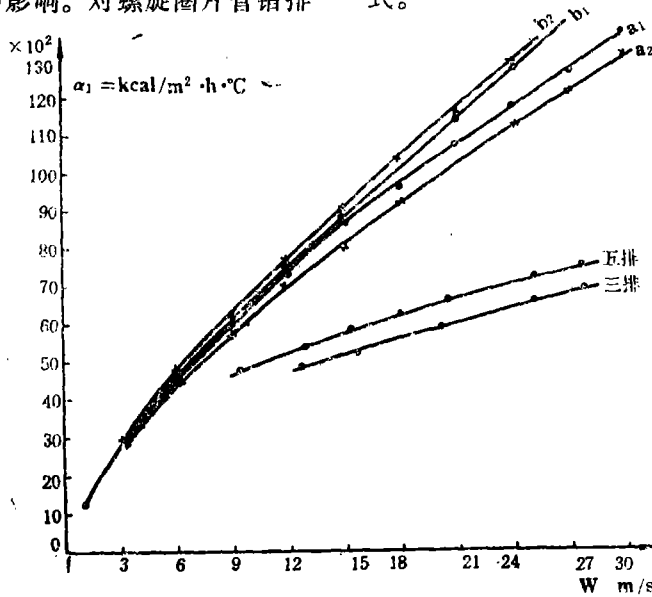


图3 按公式1和2计算和实测值的烟侧放热曲线

图中: a<sub>1</sub>和a<sub>2</sub>按公式(1)计算; b<sub>1</sub>和b<sub>2</sub>按文献[7]圆圈片错排管束对流放热系数公式计算;

a<sub>1</sub>和b<sub>1</sub>、a<sub>2</sub>和b<sub>2</sub>其圈片的几何特性、温度、物性均相同情况下所做的比较

上述公式中,未涉及到烟气侧的脏污系数 $\epsilon$ 。该系数在传热系数计算时必须考虑。本炉选取的脏污系数 $\epsilon$ 一般在0.005~0.015之间,过热器为0.005,过渡段,蒸发段、预热段 $\epsilon$ 均取0.0045。这种选取方法是按联

合标准推选的,将在以后的试验和运行中,累积经验加以修正(因为本锅炉的情况与联合标准所用燃料不同,过剩空气系数不同)。锅炉的空气过剩系数 $\alpha$ 在4~5之间,螺旋圈片的结构与一般锅炉不同,故仅作参考选

用。

在螺旋圈片管排传热计算中，金属的导热热阻不可忽略，并要考虑圈片的几何参数，如圈片的最佳高度，一般不大于19mm。本锅炉为16mm；圈片的厚度 $\delta = 1.3\text{mm}$ ；圈片间净距为5mm。本锅炉考虑到就地取材，不得不降低最佳传热性能。

### 四、螺旋圈片管排的阻力计算

烟气阻力计算，一般在热计算完全确定以后进行。在方案设计时，必须把热工计算和烟气阻力计算交叉进行。若发现烟气阻力太大，不能满足燃气轮机的背压要求时，则重新调整节距，以重新调整烟速，使之满足燃机排气压力要求为止，烟气阻力计算按 Brggs and Young 公式<sup>⑤</sup> 计算：

$$\Delta P = 18.93 \left( \frac{dw}{v} \right)^{-0.136} \left( \frac{s_1}{d} \right)^{-0.923} \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{0.515} \left( \frac{G_{vz}^2 N}{g_c p} \right) \quad (2)$$

采用苏联空气动力计算标准圆圈片管排进行计算比较，前者为后者的1.4倍左右。

### 五、洗炉

低压直流锅炉采用碱洗后加酸洗，再钝化处理。

1. 碱洗：用给水（除盐水）配0.4%  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ 、0.1%  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 和0.05%的清洗剂（TS-10）溶液，通过泵泵入锅炉并加温至90—95℃，保持在此温度下循环6小时。水速为0.8~0.9m/s，则清洗效率较佳，若油污太重，则可加0.2%  $\text{NaOH}$ 煮，直至合格验收

2. 酸洗：碱洗后立即进行酸洗，用给水配制3.0%的柠檬酸溶液，并加0.2若丁，使水温升至95—98℃，并保持此温度循环6小时，用清水冲洗至PH>6即可。

3. 钝化：

酸洗后在一周内启用锅炉可不作钝化，

否则需要钝化处理。方法是用1%  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ 溶液，保持水温90℃以上循环12小时即可。

### 六、水质

一般认为，直流锅炉水质要求高于同参数下的自然循环或强制循环锅炉。然而，目前国内尚无低压直流锅炉水质标准。本锅炉采用的水质标准，是参照我国和世界其他国家低压自然循环和强制循环锅炉水质标准拟定的，其指标如表2。因这种锅炉没有外置式汽水分离器，无法排污，凡盐类均沉积在过渡段，尤其对Ca、Mg盐类，它们在水中的溶解度很小，用水冲洗不掉，并结成硬垢，因而直流锅炉水质标准规定在任何压力下硬度为零，含氧量规定为 $\leq 0.05$ 毫克/升， $\text{CO}_2$ 为零，因两者的存在会加速腐蚀，而氧对低压锅炉可适当放大一些；铁含量较高，易形成垢下腐蚀；对于Na、Cu和 $\text{SiO}_2$ 的含量主要是燃气轮机要求，但对低压蒸汽，其Na、Cu和 $\text{SiO}_2$ 溶解度很小，其含量按中压直流锅炉要求放大了；其他项目均同于一般锅炉，而PH值保持大一些，使金属表面形成一层碱性保护膜，以防金属的再腐蚀。

表 2 给水指标

序号	名称	数值	单位	备注
1	硬 度	~0	毫克当量/升	
2	氧	$\leq 0.05$	毫克/升	
3	铁	<50	微克/升	
4	铜	<30	微克/升	
5	二氧化硅	<30	微克/升	
6	钠	<10	微克/升	
7	二氧化碳	~0	毫克/升	
8	PH	8.5~9.2		
9	联 氨	20~50	微克/升	
1	油	<1	毫克/升	

### 七 结束语

1. 在进行了多种方案的分析比较后，

得到了结构紧凑、尺寸小、重量轻的直流式螺旋圈片管余热锅炉,本锅炉投入调试运行后,已完全达到了设计指标,满足了总体论证所提出的要求。

2. 在讨论了螺旋圈片管排的热工计算及烟气阻力计算通用公式之后,提出需要进一步试验研究,并累积运行经验,以得到较精确的适用公式。

3. 文中提出洗炉、水质指标问题,为进一步试验研究及运行创造了条件。

本文在写作过程中得到闻雪友总工程师大力帮助,在此表示谢意。

### 符号说明

- $G_y$ ——烟气流量, kg/h  
 $G_{y,z}$ ——烟气质量流量, kg/m<sup>2</sup>·h  
 $\theta$ ——烟气温度, °C  
 $P$ ——工质(水、蒸汽)压力, MPa  
 $t$ ——工质(水、蒸汽)温度, °C  
 $t_{gs}$ ——给水温度, °C  
 $D$ ——蒸汽产量, kg/h  
 $W$ ——流速, m/s  
 $P_y$ ——烟气压力, Pa  
 $\alpha$ ——放热系数, W/m<sup>2</sup>·°C  
 $\lambda$ ——导热系数, W/m·°C  
 $\rho$ ——烟气密度, kg/m<sup>3</sup>  
 $\nu$ ——烟气运动粘度, m<sup>2</sup>/s  
 $d$ ——管径, mm或m

- $s_1$ ——横向节距, mm  
 $s_2$ ——纵向节距, mm  
 $h_q$ ——圈片高, mm  
 $\delta_q$ ——圈片厚, mm

### 参考文献

- [1] Halkola J T等.RACER Conceptual Design.ASME Journal of Engineering for Power,1983,105(3):621  
 [2] N.V.R.S.S.Subrahmanyam等.How to Size Waste Heat Boilers.Hydrocarbon Processing,1979  
 [3] F.E.古拉夫等,李蔚芬译.DD-963级舰余热回收系统的途径经验,ASME79-G7-159  
 [4] 王振义教授主编,换热器散热器讲义.山东工业大学  
 [5] Ganapathy V. Charts Simplify Spiral Fined-Tube Calculation.Chemical Engineering,1977,4,25  
 [6] 章正之,周中世.锅炉受热面特性和空气阻力特性模拟试验报告.杭州锅炉厂,余热锅炉研究所 1985.5  
 [7] 锅炉机组热力计算标准方法.机械工业出版社,1976,11  
 [8] C.N莫强主编.锅炉设备动力计算方法(标准方法).第3版.电力工业出版社,1981年  
 [9] 朱宽仁,刘时林.2200 KW 舰船燃蒸复合动力装置余热锅炉设计研究.热能动力工程,1988,3(5)  
 [10] 曹渝白.舰船余热锅炉的设计和优化.中国造船,1987,4(8)总99期

(渠源沥 编辑)

## Design of Once-through Waste Heat Boilers

Wang Jun, Guo Xuebin, Liu Shilin

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

### Abstract

The authors describe the design method, boiling-out procedure and required water quality of a once-through waste heat boiler for use in a parallel dual fluid combined cycle, which has been set up in China for the first time, thus providing useful data for further experimental study and operation.

**Key words:** waste heat boiler, design