

燃气轮机余热锅炉的设计特点

陈起铎 刘长和 赵时光 陈滨 孙宏宇

(哈尔滨七〇三研究所)

[摘要]本文在工程实践基础上,总结燃机余热锅炉的设计经验和设计特点。指出我国燃机余热锅炉的研制技术业已达到相当先进的水平,在国内外市场上具备强劲的竞争实力。

关键词 燃气轮机 余热锅炉 设计特点

分类号 TK229.929

1 前言

燃气轮机余热锅炉是燃机电厂的主要设备之一。90年代国内自行研制成功数以十计的燃机余热锅炉,打破国外进口产品的一统天下。目前,随着燃机电厂的广泛兴建,燃机余热锅炉在国内锅炉工业方面有了一个重要市场。

我所对余热锅炉的设计研究开展较早,技术上有所突破和创新。近二十年来,从军品到民品,从强制循环到自然循环,先后研制出近百台各种类型的余热锅炉。产品应用军工技术,博采众长,结构型式先进,主要技术性能指标同国外进口产品相比毫不逊色,重量尺寸指标和锅炉启动性能甚至达到相当先进的水平。积二十年的工程应用经验,我所已就余热锅炉的设计,特别是燃机余热锅炉的设计,创立一套成功的设计原理和设计方法,形成自己的特色,使我所研制的余热锅炉,在国内外市场上,具备强劲的竞争实力,展示着光明的应用前景。

2 锅炉型式的选择

燃气轮机余热锅炉的型式,在西欧各国多为强制循环型,如图1所示;而在美国则多

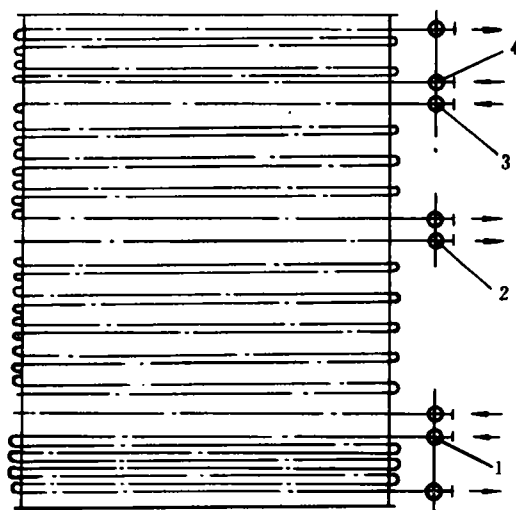


图1 双压强制循环余热锅炉

1. 过热器 2. 中(高)压蒸发管束
3. 省煤器 4. 低压锅炉管束

收稿日期 1995-07-20

为自然循环型,如图2所示。两种锅炉型式的特点如下:

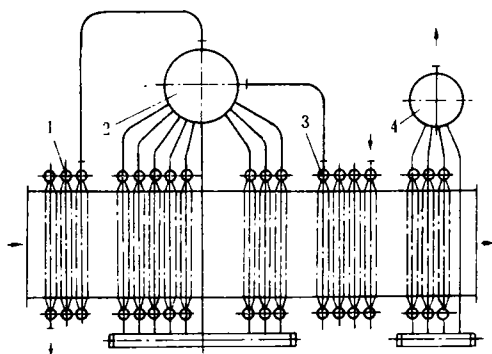


图2 双压自然循环余热锅炉

- 1. 过热器 2. 中(高)压锅炉本体
- 3. 省煤器 4. 低压锅炉

2.1 强制循环锅炉的特点

- 2.1.1 蒸发受热面可如同过热器、省煤器受热面一样,根据需要,灵活布置,或直立,或水平,或倾斜,均无不可。
- 2.1.2 锅水强制循环,受热面可采用较小直径,重量轻,尺寸小,结构紧凑。
- 2.1.3 常布置于立式烟道,烟囱与锅炉合二为一,节省地位,占地面积小。
- 2.1.4 锅炉容水量小,启动速度快,机动性好。
- 2.1.5 组装出厂,有利在用户工地的安装。
- 2.1.6 必须装设高温锅水循环泵,工作可靠性差,且需增加电耗,增加运行费用。
- 2.1.7 必须采用小弯头,制造工艺复杂。
- 2.1.8 锅炉重心较高,稳性较差,不利抗风抗震。

2.2 自然循环锅炉的特点

- 2.2.1 蒸发受热面为立式水管,常布置于卧式烟道。
- 2.2.2 锅炉型式成熟,锅炉工作安全可靠,不必装设高温锅水循环泵。
- 2.2.3 结构简单,制造加工不具任何困难。

- 2.2.4 锅炉容水量大,适应负荷变化能力强。
- 2.2.5 散装受热面在现场安装的工作量相对不大,故锅炉受热面可以散装出厂。
- 2.2.6 锅水自然循环,受热面通常采用较大管径,故锅炉重量尺寸指标较差。
- 2.2.7 锅炉重心低,稳性好,抗风抗震性强。

上述两种型式各有千秋。强制循环锅炉重量尺寸小,启动性好;自然循环锅炉可靠性、制造性较优。选择何种型式,必须具体情况具体分析,不能一概而论。例如,在深圳南山热电有限公司燃机联合循环余热锅炉的设计中,为合理利用现场有限的空间地位,我们采用中压自然循环锅炉和低压强制循环锅炉两相结合的锅炉型式,如图3所示,恰到好处地解决了余热锅炉及其烟道系统的布置问题。

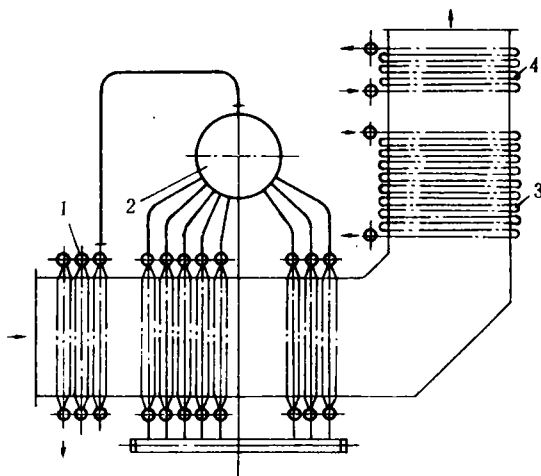


图3 两种循环方式兼有的余热锅炉

- 1. 过热器 2. 中(高)压锅炉本体
- 3. 省煤器 4. 低压锅炉管束

3 重要热工参数的确定

3.1 锅炉蒸汽参数的确定

汽轮机型号依余热锅炉可能产生的蒸汽参数、蒸汽产量而定;反过来,锅炉过热蒸汽压力、过热蒸汽温度则完全依据所选汽轮机型号而确定。

过热蒸汽压力愈高,锅炉排烟温度也愈高,而蒸汽产量则愈低。往往要求余热锅炉提供较高的过热蒸汽温度。但锅炉进口烟温不高,过热蒸汽温度难以提高。二者温差一般宜在 25℃ 以上。

过热蒸汽压力、过热蒸汽温度确定之后,即可按锅炉热平衡方程确定锅炉蒸汽产量:

$$D[i_m - i_m + \rho(i' - i_m)] = \varphi V_r (I' - I)$$

式中 D — 锅炉蒸汽产量, kg/h;

i_m — 过热蒸汽焓, kJ/kg; i_m — 给水焓, kJ/kg; ρ — 锅炉排污率, %; i' — 锅水饱和焓, kJ/kg; φ — 保热系数, %; V_r — 烟气体积流量, Nm³/h; I' — 锅炉进口烟焓, kJ/Nm³; I — 锅炉排烟焓, kJ/Nm³。

3.2 锅炉窄点温差的确定

锅炉窄点温差,也即锅炉烟气与汽水介质之间的最小温差,通常指的是蒸发管束出口处烟温与饱和温度之间的温差。此一温差的大小标志锅炉热量利用率的大小。温差愈小,锅炉热量利用率愈高,但需要的受热面也愈大。此时应权衡锅炉的费效比是否最佳。

工程实践上,窄点温差一般以 8~12℃ 为宜。

3.3 锅炉排烟温度的确定

锅炉排烟温度大小也是锅炉热量利用率大小的标志。其值可按省煤器热平衡方程确定:

$$D(1 + \rho)(i_m' - i_m) = \varphi V_r (I_{in} - I')$$

式中 i_m' — 省煤器出口水焓, kJ/kg;

I_{in} — 省煤器进口烟焓, kJ/Nm³。

按上式确定锅炉排烟温度时,省煤器出口水焓以不使省煤器在设计工况下出现给水沸腾为宜。

3.4 省煤器出口水温的确定

省煤器可以是沸腾式的,也可以是非沸腾式的。

沸腾式省煤器需要较高的给水流速,以能带走汽泡,避免管壁汽化腐蚀,但将导致给水泵压头增加,电耗增加。

实际上,在给水沸腾之后继续布置省煤器受热面与增加布置蒸发受热面相比,在传热效果上并无区别。因此,与其是设计沸腾式省煤器,倒不如多布置蒸发受热面,对自然循环锅炉尤应如此。

纵观国外进口燃机余热锅炉,在常用工况下,省煤器多设计成非沸腾式。但省煤器出口水温与饱和温度相差不多,一般约为 5℃ 左右。

3.5 受热面烟速及介质流速的确定

各受热面烟速一般按 13~19 m/s 选取。过热器烟速较高,蒸发管束次之,省煤器再次之,低压锅炉烟速最低。烟速愈高,烟气阻力愈大,燃机功率损耗愈多,综合经济指标未必最佳。

过热器蒸汽流速可按 12~25 m/s 选取。

省煤器水速,向上流动或水平流动可按 0.3~0.8 m/s 选取,向下流动则按 0.7~1 m/s 选取。

沸腾式省煤器向下流动水速应达到 1 m/s 以上。

强制循环管内锅水质量流速按防止汽水分层的最小质量流速设计,一般取为 280~320 kg/(m²·s)。循环倍率 K 不必太高, K 可为 1.3~2,以能选用容量小、耗电省的锅水循环泵。

4 传热元件的设计

4.1 扩展受热面应用概况

当代锅炉,特别是锅炉尾部受热面和余热锅炉,广泛采用新型传热元件——扩展受

热面。扩展受热面是肋片、翅片、圈片、鳍片的统称,有方形、圆形、星形、针形之分,又有直立、螺旋之别。由于此类受热面具有传热好、重量轻、尺寸小的特点,早在三四十年代即在船舶锅炉中应用,但因制造工艺复杂而使其推广应用受阻。之后,又因工艺技术的改进,钎焊、高频电阻焊等先进焊接技术的成功采用,制造工艺简化,焊接质量改善,接触热阻减小,传热效果提高。目前,在锅炉尾部受热面、余热锅炉以及低温换热设备中,扩展受热面的应用备受青睐,大有取代光管受热面之趋势。我国从国外引进的近百台各种型号燃机余热锅炉,无一例外地采用此类受热面。我国船舶锅炉燃煤电站锅炉省煤器及空气预热器,也已开始推广应用。

4.2 螺旋翅片管应用效果

螺旋翅片管是扩展受热面中应用最多、最广泛的一种受热面型式,也是我所燃机余热锅炉采用的主要传热元件。

应用实践表明,螺旋翅片管比传统的光管受热面具有明显的应用效果。二者相比,吸

收同一热量,管排数比为 1:3,重量比为 2:3,尺寸比为 1:2,烟气阻力比为 2:3,管内介质阻力比为 1:3。优点显而易见。

4.3 螺旋翅片管的设计

螺旋翅片管的主要结构特性为翅片高度 h ,翅片节距 S ,翅片厚度 δ 以及管径 d 等结构参数。

通常将翅片高度 h 和节距 S 的数值作为衡量翅化程度大小的标志。翅片高度 h 愈高,节距 S 愈小,则翅化程度愈大。反则反之。

在同样的烟气介质、烟气温度和烟气速度之下,管径愈小,翅片愈高,节距愈密,则传热效果愈佳。

翅片厚度的大小对传热系数影响不大。

提高翅片高度 h ,降低翅片节距 S ,传热系数下降而受热面迅速上升。由于受热面的影响更大,传热量增加,传热效果提高。

我所对螺旋翅片管的传热及其制造工艺,进行了长期的大量的试验研究,获得如表 1 所示的适用于工程上的工艺性可行的结构尺寸。

表 1 螺旋翅片管常用的结构尺寸

序号	管子规格	翅片高度 mm		翅片节距 mm		翅片厚度 mm	
		天然气	重油	天然气	重油	天然气	重油
1	$\phi 51 \times 3.5$	16 ~ 22	16 ~ 22	4 ~ 5	5 ~ 6	0.8 ~ 1	1 ~ 1.3
2	$\phi 38 \times 3$	16 ~ 19	16 ~ 19	4 ~ 5	5 ~ 6	0.8 ~ 1	1 ~ 1.3
3	$\phi 32 \times 3$	13 ~ 16	13 ~ 16	4 ~ 5	5 ~ 6	0.8 ~ 1	1 ~ 1.3
4	$\phi 25 \times 2.5$	10 ~ 13	10 ~ 13	4 ~ 5	5 ~ 6	0.8 ~ 1	1 ~ 1.3

翅片高度愈高,节距愈小,则焊制愈是困难。表 1 为切实可行数据,可供设计选择参考。在实际应用中,设计者应根据燃料种类、烟气、灰分、烟气速度等因素,具体情况具体分析,选择正确的结构尺寸,使产品设计更趋

合理。

4.4 螺旋翅片管传热计算

传热计算按前苏联《锅炉机组热力计算标准方法》(1973年)一书中,烟气横向冲刷环状肋片管子计算公式进行。该公式与国外

资料介绍的计算公式相近似。

污染系数 ϵ 对传热计算的影响很大,但却又是一个很难精确测定的变量。它主要取决于燃机燃用燃料、受热面结构特性、烟速及烟气冲刷情况。国外资料推荐值为:

当燃机燃用天然气时, $\epsilon = 0.000\ 35\ \text{m}^2\text{C}/\text{W}(0.000\ 41\ \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal})$;

当燃机燃用轻油时, $\epsilon = 0.000\ 8\ \text{m}^2\text{C}/\text{W}(0.00093\ \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal})$;

鉴于国内翅片管的制造质量与国外相比尚存差距,接触热阻相对较大,故在传热计算中常采用较大的污染系数 ϵ ;

当燃机燃用天然气时, $\epsilon = 0.000\ 86\ \text{m}^2\text{C}/\text{W}(0.001\ \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal})$;

当燃机燃用轻油时, $\epsilon = 0.001\ 7\ \text{m}^2\text{C}/\text{W}(0.002\ \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal})$;

当燃机燃用重油时, $\epsilon = 0.003\ 4\ \text{m}^2\text{C}/\text{W}(0.004\ \text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal})$;

实践表明,按上述数据的设计计算与锅炉热工测试的结果相当吻合。

5 锅炉结构的设计

5.1 受热面管组型式的设计

受热面管组是锅炉的基本组成部分。自然循环余热锅炉多为双集箱立式翅片管受热面,强制循环余热锅炉则多为双集箱小弯头卧式翅片管受热面。前者结构简单,制造容易,可以散装出厂,降低制造费用,从而降低产品造价;后者结构复杂,制造困难,一般只能组装出厂,产品造价较贵。

正是由于受热面管组型式具有较多优点,自然循环余热锅炉获得愈来愈多的应用。

5.2 锅炉管径的选取

锅炉管径大小对锅炉重量尺寸指标具有决定性的影响。管径愈小,传热愈好,重量尺寸愈小。设计资料表明,锅炉管径减小二分

之一,锅炉重量可减少三分之二。这就是说,当锅炉管径采用 $\phi 51 \times 3.5$ 吋的锅炉重量为 100%,则管径 $\phi 38 \times 3$ 吋为 67%,管径 $\phi 32 \times 3$ 吋为 50%,管径 $\phi 25 \times 2.5$ 吋为 33%。可见锅炉管径对锅炉重量影响之大。无怪乎现代锅炉管径已有逐渐减小之趋势。

作为船舶锅炉研究所,我们习惯于采用较小的管径,以利降低锅炉重量尺寸。但陆用锅炉与船用锅炉管径大小的推荐数据大相径庭。实炉应用也是相差悬殊。陆用管径大,船用管径小。

我们认为,燃机自然循环余热锅炉有条件选择更小的管径。理由是:其一,用于发电的大型燃机余热锅炉,通常具有良好的给水品质;其二,锅炉管束自然循环高度一般比船舶锅炉更高,水循环条件更好,小管径不会导致水循环恶化;其三,烟气温度低,即使因管径小而导致个别管子结垢堵管,也无烧坏管子之弊。

工程实践表明,对强制循环锅炉,可以采用 $\phi 32 \times 3$ 、 $\phi 29 \times 2.5$ 、 $\phi 25 \times 2.5$ 或 $\phi 20 \times 2$ 的管子;对自然循环锅炉,则可采用 $\phi 38 \times 3$ 、 $\phi 32 \times 3$ 、 $\phi 29 \times 2.5$ 或 $\phi 25 \times 2.5$ 的管子。选用更大管径,徒费金属,大无必要。

5.3 管束排列与节距的选取

5.3.1 管束排列

管束的排列有错列与顺列两种,错列管束的传热优于顺列管束约 20%,但其烟气阻力大,且其管间支撑定位装置的设计比较困难。

工程实践中,为减小锅炉重量尺寸,错列管束的应用还是更多一些。

5.3.2 管间节距

陆用锅炉设计规定,管间传热横向节距为 $S_1 \geq (2 \sim 2.5)$ 管径 d ,纵向节距 $S_2 \geq 2d$ 。我们认为,这一规定对燃煤锅炉是否恰当尚待商榷;对燃油锅炉,特别是对燃油余热锅炉,显然不能照抄照搬。

船舶锅炉设计规定,对燃煤锅炉,可取 $S_1 \geq d + 20 \text{ mm}$,对燃油锅炉,可取 $S_1 \geq d + 15 \text{ mm}$ 。某些国外船舶锅炉设计资料甚至认为,燃油锅炉的管距比 $\frac{S_1}{d}$ 只要满足 $1.25 \leq \frac{S_1}{d} \leq 2$ 或 $S_1 \geq d + 13 \text{ mm}$ 即可。

上述两种规定,其值差别太大,我们认为,对于燃用优质燃料的燃机余热锅炉,按照船舶锅炉的设计规定,更加合乎实际。这已为许多实践所证实。

5.4 锅筒内径的选取

锅筒是锅炉的主要部件,重量大,制造难度也大。锅筒的作用主要在于保证蒸汽品质及布置锅炉管束。锅筒内径按其作用选取。

我们推荐按表 2 的允许值设计锅筒内径。没有必要采用其他保守的规定设计过大的锅筒内径。

表 2 中锅筒蒸汽容积负荷 R_v 计算公式为:

$$R_v = \frac{DV}{\frac{\pi D_n^2 L \pm BL}{\delta}} \quad \text{m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{h})$$

表 2 蒸汽容积负荷及自蒸发表面逸出速度允许值

锅筒蒸汽压力 P , (MPa)	蒸汽容积负荷允许值 R_v , $\text{m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{h})$	蒸汽自蒸发表面逸出速度允许值 W_n , m/s
2.75(28kgf/cm ²)	1850	0.36 ~ 0.33
3.92(40kgf/cm ²)	1700 ~ 1750	0.32 ~ 0.34
5.89(60kgf/cm ²)	1400 ~ 1450	0.24 ~ 0.26
7.85(80kgf/cm ²)	1200 ~ 1250	0.20 ~ 0.22

式中 V — 锅筒蒸汽压力下的干饱和蒸汽比容, m^3/kg ;

D_n — 锅筒内径, m ;

L — 锅筒上升管边管中心距, m ;

B — 锅筒水平中心线与正常水位之

间距离, m 。

蒸汽自蒸发表面逸出速度 W_n 。计算公式为

$$W_n = \frac{DV}{3600D_n L} \quad \text{m/s}$$

必须指出,由于燃机余热锅炉过热器通常采用允许干烧的合金材料,故按表 2 设计的锅筒内径虽然较小,但既能保证一定的蒸汽品质,又决不会发生过热器受热面积垢超温烧坏问题。相反,如按陆用锅炉有关标准设计,锅筒内径将加大,重量尺寸将增加,经济上决非所宜。

5.5 取消过热器安全阀

设置过热器安全阀的目的在于锅筒超压泄压时,有一定的蒸汽流量流经过热器,保护过热器受热面免致超温烧坏。

然而燃机余热锅炉过热器决不存在超温烧坏问题。过热器工作壁温与烟气温度通常相差无几,况且其材料多为合金钢材,可耐温度比烟气温度还高,运行中允许干烧,任何情况下都不会烧坏。因此在过热器上设置造价昂贵的高温安全阀实无必要,我们在屡次设计中均予取消。

6 典型燃机余热锅炉主要技术规范

主要技术规范详见表 3。

7 锅炉性能特点

根据上述设计原理和设计方法,我所设计出一系列独具特色的燃机余热锅炉。这里介绍其中一种的性能特点。锅炉型式为卧式烟道螺旋翅片管双压自然循环锅炉。此种锅炉锅内过程与国外自然循环锅炉基本一样,

表3 余热锅炉主要技术规范

序号	名称	单位	PG5331 燃机	PG6531 燃机
1	锅炉型式	/	双压自然循环	双压自然循环
2	环境温度	℃	15	15
3	燃机出口烟温	℃	493	548
4	锅炉进口烟温	℃	490	543
5	燃机烟气重量流量	kg/s	118.1	136.4
6	燃机烟气容积流量	kNm ³ /h	327	377
7	锅筒蒸汽压力	MPa	4.12	4.22
8	过热蒸汽压力	MPa	3.82	3.82
9	过热蒸汽温度	℃	445±10	445±10
10	过热蒸汽产量	t/h	45.5	65
11	低压蒸汽压力	MPa	0.2	0.2
12	低压蒸汽产量	t/h	6.5	7.5
13	锅炉排污率	%	2	2
14	锅炉给水温度	℃	105	105
15	锅炉内烟气阻力	kPa	~2.8	~2.8
16	锅炉重量	t	215	215
17	锅炉尺寸(长×宽×高)	mm	8200×8200×16185	8500×8580×16236

炉内过程则与国外强制循环锅炉毫无二致。故锅炉兼具两型锅炉特点,是两型锅炉完美的结合。其性能特点如下:

1. **工作安全可靠** 锅炉设计以国内外广为应用的燃机自然循环余热锅炉为母型,锅炉型式先进、成熟,具有一般自然循环锅炉固有的特点。

2. **重量轻,尺寸小** 锅炉受热面基本结构尺寸与国外强制循环锅炉大致相同,但却省去大量的小弯头、连通管等非受热元件,故锅炉重量尺寸指标达到任何同类产品难以匹敌的先进水平。

3. **经济性好** 锅炉窄点温差为 10℃左右,省煤器出口水温低于锅水饱和温度 5℃左右,余热利用率高,经济性指标达到相当先进的水平。

4. **启动速度快** 采用舰船锅炉设计技术,具备舰船锅炉特性,启动速度达到同类产品先进水平。此一特性对启动频繁的调峰电站尤其难能可贵。

5. **运行费用省** 锅炉不设锅水强制循环泵,不但没有工作不可靠的设备,而且自耗电少,运行成本低。

6. **结构简单,制造容易,安装方便。**

7. 烟道截面形状好 锅炉烟道截面边长比例较一般燃机余热锅炉为佳,烟气充满度好,炉内热力均匀,热偏差小,受热面冲刷较完全,对改善传热性能,提高工作可靠性,降低烟气阻力都有利。

8. 锅炉重心较低,稳性较好,抵抗台风和地震的能力较强。

参 考 文 献

- 1 Пушкин И. П. Судовые Паровые котлы. ЛЕНИНГРАД: Изд СУДОСТРОЕНИЕ. 1965
- 2 Jason Makansi. Combined-cycle power plants. Power. 1990 (6)
- 3 陈起铎等. 补燃式余热锅炉. 热能动力工程. 1991, 5(3)
- 4 陈起铎等. 国内首制 PG5361 蒸汽回注燃气轮机余热锅炉. 热能动力工程. 1992, 9(5)

作者简介:陈起铎,男,1939年生。研究室主任工程师、高级工程师。享受国务院政府特殊津贴。全国锅炉专业科技成果评审委员、黑龙江省科技成果鉴定委员。哈尔滨七〇三研究所军民用锅炉主要技术负责人。获省、部级以上科技成果10余项,其中两项获部级科技进步一等奖。发表学术论文20余篇。

净化燃煤的新技术

据《New Scientist》1992年11月7日报道,在美国纽约,煤炭研究人员研制出一种能增加燃煤电站热效率并能减少硫排放的新方法,因而使作为发电燃料的煤更具吸引力。

美国通用电气(GE)公司和美国能源部(DOE)在纽约的斯克内克塔迪完成了一项为期两年的整体煤气化联合循环(IGCC)装置的试验研究,该气化过程将从1996年用于美国的两座电站,伊利诺斯州的65兆瓦电站和佛罗里达的265兆瓦电站。

IGCC装置基于联合循环过程,以燃烧天然气驱动燃气轮机而余热产生蒸汽驱动汽轮机,不被废弃。为了替代天然气,IGCC装置靠气化器中煤转化的煤气运行,类似于过去城市用的煤气。通常,煤潜能的10%损失于该转化过程,而其优越性在于这类电站产生很少的污染。

与传统燃煤电站烟道脱硫比较,IGCC装置不仅消耗的煤比较少而且产生的二氧化碳较前者少10%,无甲烷、硫约为前者的1/7,以及氧化氮约为前者的1/3。这些污染物在气化作用之后即被清除。取决于所使用的气化器的类型,在550—1300℃之间形成煤气。标准化脱硫是用40—65℃的水进行洗涤,此后煤气须重新加热到550℃,以便使燃气轮机有效地工作。冷却和再加热煤气要损耗能量而且需要供应大量的冷却水。

在IGCC装置中由一个固定床气化器在540℃下生产煤气。煤气通入锌铈酸盐或锌钨酸盐粒,吸收硫而形成硫化锌。它在氧中燃烧又形成二氧化硫,转化成硫酸和氧化锌,是粒状成分之一。然后煤气以合适的温度直接进入燃气轮机,清除了99.99%的硫,而传统的烟气脱硫仅除去(90—95%)的硫。

传统燃煤电站效率仅为37%,而IGCC装置效率为(45—50)%,几乎与天然气联合循环电站的效率一样。GE研究与开发中心的托尼·弗曼认为,热煤气净化方法可提高装置效率(1—2)%。

估算表明,IGCC装置发电成本略高于燃煤电站,而联合循环电站的投资费高于简单循环燃气轮机电站,但比传统煤电站低得多。

国外热电冷三联产的现状和前景—热电联产工程系列报告之四=The Present Status and Future Prospects of Overseas Engineering Projects for the Triple Production and Supply of Thermal Energy, Electricity and Refrigeration—the Fourth in a Series of Technical Reports on Cogeneration Systems [刊,中]/Qiang Guofang(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -259-265

On the basis of three earlier reports by the present author this paper focuses on some engineering projects for the triple production and supply of process steam, electricity and refrigeration, a new technology evolving from conventional cogeneration systems. The basic concepts and some specific application examples of the said technology are presented along with a general review of the related research work currently conducted in China and a brief assessment of the development prospects. Key words: cogeneration, district heating and refrigeration, heat pump, absorption refrigerator

退役航空涡扇发动机地面应用的有效途径之一——再热燃气—蒸汽联合循环=Combined Gas-steam Turbine Reheat Cycle—an Effective Approach for the Ground Application of Out-of-commission Aero-turbofan Engines[刊,中]/Wu Haoshan, Tao Yue (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -266-271

Discussed in this paper is a combined gas-steam turbine reheat cycle with an out-of-commission aero-turbofan engine serving as the gas generator. The combustion gas of an inner duct after mingling with the air of an outer duct is heated in a reheat combustor and then enters a power turbine to do expansion work. With the the help of a waste-heat boiler a certain portion of the gas turbine exhaust gas heat is recovered to produce steam for driving a steam turbine, rendering useful power. Through specific examples and calculations it is shown that the said cycle features high power output and significantly enhanced cycle efficiency. Key words: aero-turbofan engine, combined gas-steam turbine reheat cycle, waste-heat utilization

离心叶轮内部三元流场计算在实际工程中的应用=The Calculation of the Inner Three-dimensional Flow Field of a Centrifugal Turbine Disc and Its Engineering Applications[刊,中]/Ma Shengyuan, Zhao Yousheng, Liu Yuliang (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -272-278

By use of two kinds of relative stream surface theory and a finite differential method the mathematical solution of a centrifugal turbine disc inner flow field has been attained. Based on the calculation results the authors have identified the deficiency of the original turbine disc structural design and calculated the inner flow field of the newly improved turbine disc. Key words: flow field, numerical computation, turbine disc modification

EC-301 旋转叶轮整体结构应力分析=The Stress Analysis of a Rotating Turbine Disc Integral Structure[刊,中]/Zhou Chuanyue, Wang Xu(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -279-282

By way of the three-dimensional stress analysis of EC-301 closed type centrifugal turbine disc integral structure the authors have come up with a novel method of integral structure stress analysis for a rotating turbine disc by using general finite element analysis procedures and temperature-treated interference fit. Also given is a method for the identification of slackening out and the determination of a suitable interference fit between the turbine disc and the shaft. Key words: turbine disc, finite element, stress analysis

燃气轮机余热锅炉的设计特点=Design Features of Waste-heat Recovery Boilers for Gas Turbines[刊,中]/Chen Qiduo, Liu Changhe, Zhao Shiguang, Chen Bin, Sun Hongyu. (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -283-290

Based on years of engineering practice the authors have summed up the design experiences and features of waste-heat recovery boilers for gas turbines, noting that the present technology of home-made waste-heat recovery boilers of gas turbines has already attained a quite advanced level with a strong competitive position on both the domestic and international market. Key words: gas turbine, waste-heat boiler, design features

首座小型天然气发电锅炉的设计与运行 = The Design and Operation of the First Home-made Low-capacity Natural Gas-fired Power Plant Boiler [刊, 中]/Li Zongxi, Liu Wanzhen (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -291-296

A brief description is given of the thermodynamic characteristics of a first home-made low-capacity boiler installed in a power station. Also discussed are some specific features concerning the selection of boiler furnace and burners, etc. All the above can provide useful hints for the further improvement of new designs. Key words: boiler, natural gas, combustion, electric power generation

煤及灰辐射特性参数研究 = A Study on Coal and Ash Radiation Characteristics Parameters [刊, 中]/Tang Min (Harbin 703 Research Institute) Ruan Liming, Yu Qizheng, Liu Linhua, Tan Heping (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -297-301

Through the utilization of the transmissivity spectrum of rare-phase homogeneous microparticle dispersion system of three types of Heilongjiang Province coal and its ash, experimentally determined by an infrared spectrophotometer, coupled with the adoption of a highly precise Lorenz-Mie electromagnetic theory and dispersion K-K relation, the authors have made an inverse computation of the basic radiation characteristics parameters (compound refractive index) of microparticles and on this basis determined the decay factor, scattering factor and absorption factor of the said particles. As the only simplification condition of the computation is the extrapolation relation of a limited domain experimental data, the method under discussion in this paper features high precision and a wide applicability. The authors have analysed the effect of transmissivity experimental error on the result of inverse computation and pointed out that the experimental precision of the transmissivity will exercise an influence on the solution of the compound refractive index. Key words: radiation characteristics, Lorenz-Mie theory, microparticle, coal, ash

汽轮机隔板分离器的内流场的数值研究 = A Numerical Study on the Inner Flow Field of a Steam Turbine Diaphragm Moisture Separator [刊, 中]/Luo Chunxin, Sun Xianliang (Harbin 703 Research Institute), Li Xuelai (Dalian University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -302-305

By use of a SIMPLE method a numerical calculation is conducted of the vapor-liquid dual phase flow field in the moisture separator of a steam turbine diaphragm. Also discussed in the paper is the effect of relevant working parameters of such a separator on the moisture removal efficiency. Key words: diaphragm moisture separator, steam turbine, internal moisture removal

新型高效汽水分离元件研究 = A Study on a New Type of High-efficiency Moisture Separating Elements [刊, 中]/Lu Yibo, Ren Abao, Chen Yuxiang (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -306-309

On the basis of theoretical analyses and experimental tests the authors have proposed a new type of high-efficiency moisture separating elements, which can retain their highly effective moisture separation performance even at an inner flow speed as high as 4.5-5.0 m/s. This makes it possible to considerably reduce the space occupied by the separator and also its metallic material consumption. Key words: moisture separation, test elements, efficiency