

W 型火焰锅炉对低挥发份煤的适应性及其燃烧系统设计分析

郭晓宁(武汉锅炉厂)

〔摘要〕 文中分析了低挥发份煤的主要特征及如何组织其煤粉混合物与燃烧系统以满足对着火稳定及提高燃尽度的要求,而 W 型火焰锅炉是满足这一要求的最佳选择。文中并对 W 型火焰锅炉燃烧设备的设计作了分析。

关键词 W 型火焰电站锅炉 低挥发份煤的燃烧

分类号 TK222

1 前言

在我国,低挥发份煤的资源极为丰富,分布的地区十分辽阔:湖北、河南、山西、福建、山东、湖南等省均有丰富的蕴藏量。低挥发份煤在华北、华中、华东等地使用很多。因此仔细研究低挥发份煤在电站锅炉不同负荷工况下的着火稳定,火焰前沿的稳定及提高燃尽度对我国的电力建设有着重要意义。

2 低挥发份煤煤粉空气混合物的燃烧动力学特性

2.1 低挥发份煤的特征

低挥发份煤的特征是着火性能差。活化能要较烟煤、褐煤高很多,着火温度高,燃尽度较差,对电站锅炉来说,要很好组织煤粉空气混合物,并对燃烧装置及炉膛作认真考虑,才能保证着火稳定与较高的燃尽度。

根据文献〔1〕,有关煤种的活化能见表:

煤种	挥发份(干燥基) %	活化能(J/mol) E
烟煤	31	74106
烟煤	35	74106
烟煤	39.8	49404
褐煤	37.4	46473
无烟煤	11.4	117649

2.2 低挥发份煤煤粉气流的着火特性及其调整

煤粉本身的着火温度与煤粉空气混合物的着火温度是二个不同的概念。煤粉的着火温度在特定的试验规范下是常数。而煤粉空气混合物的着火温度随混合物本身温度的不同,以及混合物中煤粉浓度的不同和空气中氧浓度的不同而改变,因而是一个变数。因此,燃烧设计工程师的职责在于改变影响

煤粉空气混合物的诸因素使那些着火温度高不易着火的低挥发份煤的煤粉变为较易着火,降低了着火温度的煤粉空气混合物,从而使着火稳定。

2.3 煤粉空气混合物着火温度的计算

根据文献[2],煤粉空气混合物的着火温度,可近似按下列方程组计算:

$$\begin{cases} \frac{1}{\psi}(0_b - 0_{ob}) = \frac{\tau_{ak}}{\tau_{ak} + 0_b^{1.75} e^{\frac{1}{0_b}}} \\ 0_b = \frac{1 + \frac{2}{\psi} 0_{ob} - \sqrt{1 - 4 0_{ob} - \frac{4}{\psi} 0_{ob}^2}}{2(1 + \frac{1}{\psi})} \end{cases}$$

式中: ψ —表示煤粉空气混合物的无因次折算发热量

$$\psi = \frac{RqC_0}{EC_p}$$

R —通用气体常数 1.986×4.1868

(kJ/mol · K)

q —混合物的发热量,即 1 摩尔空气与当量煤粉化合,发出的热量,燃烧效率取为 0.85 ~ 0.95,包括空气带入的物理热 kJ/mol

C_0 —煤粉空气混合物中,煤粉的初始浓度 kg 煤粉 / kg 空气

E —煤的活化能

C_p —空气的定压摩尔比热 kJ/mol · K

0_b —导致煤粉气流着火的无因次温度,其对应的绝对温度为 $T_b = \frac{E}{R} 0_b$

0_{ob} —远离煤粉表面导致着火的反应气体的无因次温度,其对应的绝对温度为 $T_{ob} =$

$$\frac{E}{R} 0_{ob}$$

τ_{ak} —煤的动力常数与空气的扩散交换系数的比值 $\tau_{ak} = \frac{K_0}{\alpha_a}$

K_0 —煤的动力常数 m/s

α_a —空气的扩散交换系数 m/s

e —自然对数的底

上述公式中,煤粉空气混合物的折算发热量有重要意义。而且这一数值可以人为加以组织调整。当折算发热量愈高,煤粉空气混合物的着火温度越低,即愈容易着火。

2.4 低挥发份煤煤粉空气混合物火焰稳定分析

着火稳定与火焰稳定二者在定义上既有不同又有着密切联系。煤粉空气混合物的着火温度愈低,着火越稳定。而火焰稳定则与混合物自出口喷出的流速,炉内卷吸回流的流体力学工况及火焰传播速度有关。

在火焰传播速度等于射流速度的地方,火焰就会稳定下来,形成了火焰前沿。对贫煤及无烟煤来说,单纯的化学动力学因素,如混合物中的煤粉浓度和混合物的初温等,不足以使其刚达到喷口出口,或离出口距离很近,即行着火。而需在炉内流动一段距离,吸收炉内介质的热量且整个流束的湍动度也增加了,这时大大提高了火焰传播速度。同时气流射出以后,流速也不断衰减,当达到某一射流流速与火焰传播速度相平衡的一系列点,才能形成稳定的火焰前沿,创立火焰稳定的良好条件。对于贫煤与无烟煤来说,其火焰传播速度在相同炉内工况下与烟煤相比,大为降低。

因此,对于低挥发份煤,为了保证着火与火焰稳定,应作到:

- (1) 提高混合物中煤粉的初始浓度和初始温度以提高煤粉空气混合物的折算发热量。
- (2) 降低煤粉空气混合物离开喷口的速度。
- (3) 提高着火区域温度。
- (4) 提高卷吸回流量。

3 采用旋风分离器浓缩煤粉的 W 型火焰锅炉燃烧器分析

3.1 带旋风分离器的高浓度煤粉燃烧器分析

取岳阳电厂 360MW 机组锅炉为例。锅炉纵剖视图见图 1。燃烧器简图见图 2。燃用煤种为

$$= 0.519 \frac{\text{kg 煤粉}}{\text{kg 空气}}$$

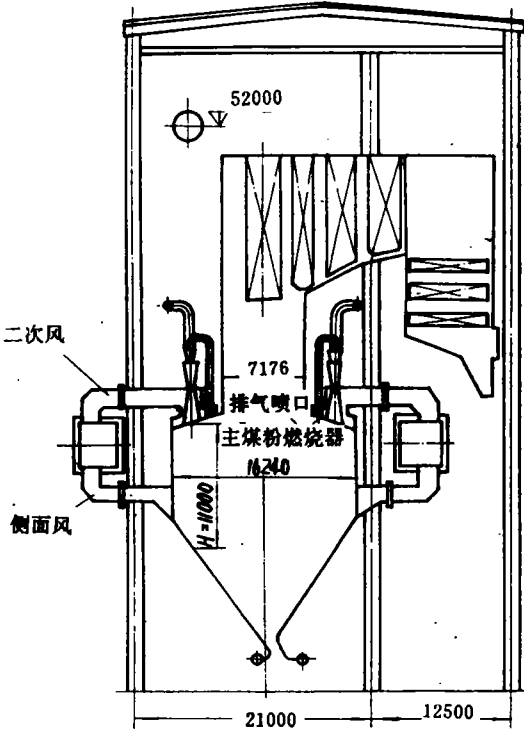


图 1 360 MW 机组 W 型火焰锅炉纵剖视图

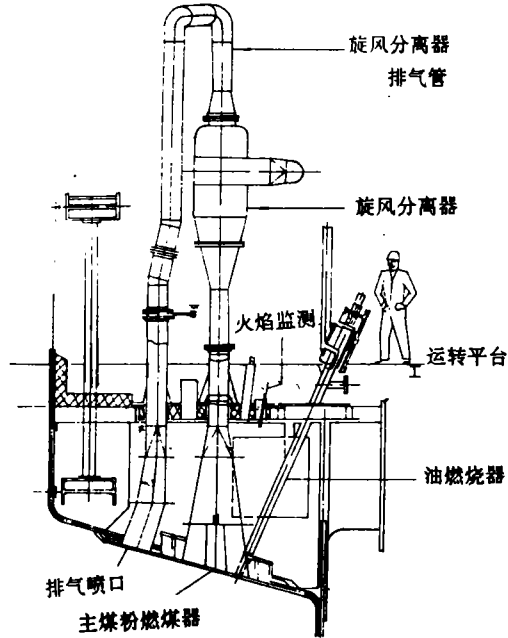


图 2 360 MW 机组 W 型火焰锅炉燃烧器布置示意图

在 W 型火焰锅炉的燃烧装置中,在煤粉空气混合物进入主火嘴前,使其先进入一旋风分离将煤粉空气混合物进行浓缩,把 50% 的一次风和 90% 的煤粉分离出来,通过主火嘴进入炉膛。另外 50% 的一次风和 10% 的煤粉则通过排气喷口进入炉膛⁽³⁾。

则此时,进入主火嘴的煤粉浓度为:

$$C_0 = \frac{0.9}{0.5} \times 0.519 = 0.932 \text{ kg/kg}$$

分别计算以上二种煤粉浓度混合物的着火温度。

(a) 当 $C_0 = 0.519 \text{ kg/kg}$, 一次风粉混合物的温度为 140°C , 煤的动力常数 $K_0 = 5.6 \times 10^4 \text{ m/s}^{(4)}$ (无烟煤), 煤的活化能为 $E = 3 \times 10^4 \times 4.1868 \text{ kJ/mol}^{(4)}$, 则:

为: $C^y = 69.23\%$, $H^y = 2.29\%$, $O^y = 3.05\%$, $N^y = 1.0\%$, $S^y = 0.29\%$, $W^y = 6.75\%$, $A^y = 17.39\%$, $V^y = 10\%$, $Q_{hw} = 25769 \text{ kJ/kg}^{(3)}$ 。采用双进双出球磨机直吹系统。一次风温 342.6°C , 二次风温 325.5°C 。

当一次风率为 18% 时,煤粉空气混合物的初始浓度为:

$$C_0 = \frac{\text{煤粉总重}}{\text{一次风总重}} \text{ kg/kg}$$

$$= \frac{1}{6.67 \times 1.25 \times 0.18 \times 1.285}$$

$$q = \frac{22.4}{6.67} \times \frac{25769}{4.1868} \times 0.95 + 140 \times 7.104$$

$$= 20631 \times 4.1868 \text{ kJ/mol}$$

$$\phi = \frac{RqC_0}{EC_p} = \frac{1.968 \times 20631 \times 0.519}{3 \times 10^4 \times 7.104} = 0.0977$$

根据 $(\frac{D_B}{D_0}) = (\frac{T_B}{T_0})^{1.75}$ (4)

$$D_B = D_0 (\frac{T_B}{T_0})^{1.75} = 18.1 \times 10^{-6} (\frac{0_B}{R} E)^{1.75} \times \frac{1}{T_B^{1.75}}$$

$$= 18.1 \times 10^{-6} \frac{(3 \times 10^4)^{1.75}}{1.986^{1.75}} \times \frac{0_B^{1.75}}{273^{1.75}}$$

$$= 0.02030_B^{1.75}$$

由 $Nu = \frac{\alpha_d d}{D}$, 对煤粉燃烧而言, $Nu = 2^{(4)}$, 煤粉颗粒直径取为 $d = 50, \mu = 50 \times 10^{-6} \text{ m}$, D 为空气流的扩散系数, 对应于着火点 B 表示为 D_B .

$$\therefore \alpha_d = \frac{2D_B}{d} = \frac{2 \times 0.02030_B^{1.75}}{50 \times 10^{-6}} = 8120_B^{1.75}$$

$$\text{无因次数 } \tau_{ak} = \frac{K_0}{\alpha_d} = \frac{5.6 \times 10^4}{8120_B^{1.75}} = 68.9660_B^{1.75}$$

将以上数值代入方程组, 并整理后得:

$$\begin{cases} 10.03(0_B - 0_{0B}) = \frac{68.966}{68.966 + 0_B^{1.75} e^{\frac{1}{0_B}}} \\ 0_B = \frac{1 + 20.06Q_{0B} - \sqrt{1 - 40_{0B} - 40.120_{0B}^2}}{22.06} \end{cases}$$

解之得 $0_B = 0.0945, 0_{0B} = 0.0846$

$$T_B = \frac{E}{R} 0_B = \frac{3 \times 10^4 \times 0.0945}{1.986} = 1427K$$

$$t = 1427 - 273 = 1154^\circ C$$

(b) 当 $C_0 = 0.932$ 时

$$\phi = \frac{RqC_0}{EC_p}$$

$$\frac{1.986 \times 20631 \times 0.932}{3 \times 10^4 \times 7.104} = 0.179$$

其它数值不变, 则有下列一组方程

$$\begin{cases} 5.586(0_B - 0_{0B}) = \frac{68.966}{68.966 + 0_B^{1.75} e^{\frac{1}{0_B}}} \\ 0_B = \frac{1 + 11.1730_{0B} - \sqrt{1 - 40_{0B} - 22.3440_{0B}^2}}{13.36} \end{cases}$$

解之得 $0_B = 0.0844, 0_{0B} = 0.0788$

$$\text{对应之 } T_B = \frac{E}{R} 0_B = \frac{3 \times 10^4}{1.986} \times 0.0844$$

$$= 1275K$$

$$t_b = 1275 - 273 = 1002^\circ C$$

此表明, 当采用 W 型火焰锅炉的旋风分离器, 使煤粉气流浓缩, 即可使煤粉气流的着火温度下降了 $1154 - 1002 = 152^\circ C$ 。另一方面, 经过浓缩以后, 气流重量大为减少, 使气流可以尽快地被加热到着火温度, 这对于无烟煤煤粉气流的着火是十分有利的, 使稳定着火得到有利的保证。

3.2 主燃烧器主火嘴一次风出口速度与下部炉膛高度的分析

在一般门形炉布置中, 当采用四角喷燃的缝隙式燃烧器时, 其一次风喷出速度为 $27 - 32 \text{ m/s}$ 。而岳阳电厂 W 型火焰炉膛燃烧器一次风出口速度仅为 $10 \sim 15 \text{ m/s}$ 。即如前分析, 当煤粉气流自喷口喷出速度降低时, 可使气流离出口很近, 即衰减到火焰传播速度, 从而可得到稳定的火焰前沿。另一方面, 整个下部炉膛内衬以耐火砖从而形成高温燃烧区。着火区域温度愈高, 着火距离越近。再有, 整个二次风包围在一次风的周围, 即煤粉气流一旦着火以后, 立即补充大量氧气, 从而形成高煤粉浓度, 高温及高氧浓度的煤粉着火有利区, 有利于保证火焰的稳定。

参见图 1, 下部炉膛高度 H 的确定根据之一是应根据极端情况, 即拱顶部一次风喷口出口气流在最高流速情况下不至冲到底部。设喷口射出气流的流速为 W , 则射流流速的功能将变成位移所作的功, 故有 $\frac{mu^2}{2} = F \cdot H = mgH$ 。

$$\text{所以 } H = \frac{W^2}{2g}$$

在岳阳电厂一次风最高流速为 15 m/s , 代入后得出 $H = 11.2 \text{ m}$, 实际设计取为 11 m 。

4 采用 Pax 燃烧器的 W 型火焰锅炉燃烧设备分析

我国上安电厂 350 MW 机组 W 型火焰锅炉系由加拿大 BW 公司设计制造,其燃烧器采用 Pax 燃烧器,如图 3 所示。煤粉空气混合物经转弯,使管道外缘煤粉的浓度大增,尔后将偏内侧温度较低的一部分空气(~140℃)抽走,而换之以可调节风量的高温空气(335℃),如此来调节煤粉空气混合物的煤粉浓度及初温。

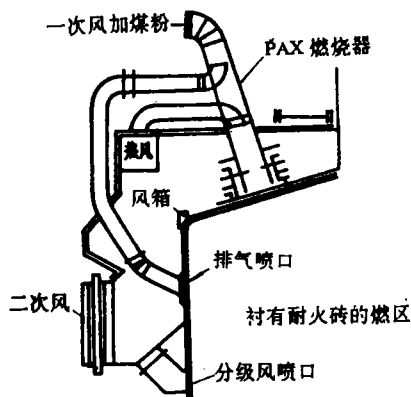


图3 Pax燃烧器布置图

仍以本文所给煤种为例,抽风量内径与主管道内径比为 0.65^[5],故其面积比为 $(0.65)^2 = 0.423$ 也即抽走了 42.3% 的空气与 15% 左右的煤粉。经过抽取,主管尚剩 85% 的煤粉及 57.7% 的空气。在极端情况,热风门全关,如仍用 18% 的一次风率,则煤粉浓度变为 $C_0 = \frac{0.519 \times 0.85}{0.577} = 0.764 \text{ kg/kg}$

此时,煤粉空气混合物的折算发热量为

$$\phi = \frac{RqC_0}{EC_p} = \frac{1.986 \times 20631 \times 0.764}{3 \times 10^4 \times 7.104} = 0.147$$

则有下列一组方程

$$\begin{cases} 6.81(o_b - o_{ob}) = \frac{68.966}{68.966 + o_b^{1.75} e^{0.01}} \\ o_b = \frac{1 + 13.62o_{ob} - \sqrt{1 - 4o_{ob} - 27.24o_{ob}^2}}{15.62} \end{cases}$$

解之得 $o_b = 0.0884, o_{ob} = 0.08$

$$T_b = \frac{E}{R} o_b = \frac{3 \times 10^4 \times 0.0884}{1.986} = 1335 \text{ K}$$

$$t_b = 1335 - 273 = 1062 \text{ C}$$

与配旋风分离器的燃烧器相比,Pax 燃烧器混合物的着火温度要高一些。故一般 Pax 燃烧器适用于贫煤($V^r = 15\% \sim 20\%$);而旋风分离器则适应于无烟煤。

如略开热风门,煤粉浓度将稀释,由于进入高温空气,使煤粉气流温度有所升高(经计算补足温度为 335℃ 的 42.3% 空气,混合温度变为 194℃),但混合物的折算发热量仍将比 0.764 为低,故上面计算的着火温度,是在所有工况下最低的煤粉气流着火温度。

5 W型火焰锅炉运行工况简析

5.1 岳阳电厂 360 MW 机组 W 型火焰锅炉自 1991 年 9 月投产以来,一直保持运行稳定,机组没有因为锅炉原因而造成停机,在各种工况下,飞灰含碳量均小于 5%。

5.2 上安电厂 350 MW 机组 W 型火焰锅炉 Pax 燃烧器着火稳定达到预期效果(煤的可燃基挥发份 $V^r = 16\%$)。曾在 45% BMCR 时断油。

6 讨论与结束语

6.1 目前我国已有六台大容量机组 W 型火焰锅炉投入运行,东方锅炉厂正引进 FW 公司 W 型火焰锅炉技术,正在设计 600 MW 机组的 W 型火焰锅炉^[6]。由此可见,W 型火焰锅炉获得我国电力工业部门的重视,在我国有着广阔的发展前景。

6.2 文献[2]是本文进行分析的重要理论基础之一。文献[2]是将前苏联科学院院士 N·N·Semenov 的理论^[4]应用到具体的煤粉燃烧实践中来。文献[2]的研究成果已为我国著名大学的教授所引用^{[7][8]}。Semenov 理论虽

然作了若干简化和假定,但计算结果与实际工况数值吻合较好。该公式的应用也有一定的范围,即煤粉浓度过低的气流不能应用。在通常使用的煤粉浓度及高浓度煤粉气流计算数值与实测数值非常接近。有在工业计算上的使用价值。

6.3 带旋风分离器的燃烧器适宜于挥发物较低的无烟煤,因为经过高度浓缩以后,使煤粉气流的着火温度大为降低,有利于无烟煤的着火。

6.4 Pax 燃烧器结构较为简单,依靠转弯来浓缩气流,但转弯半径与管道内径的关系要计算。笔者已在国内有关文献上计算了其中的几何学与力学关系^[9]。Pax 燃烧器虽然浓缩程序不如旋风分离器来得高,但对贫煤来说,已经可以达到预期效果。但炉膛设计要适当。

6.5 运行实践表明,W 型火焰锅炉没有因为燃烧设备问题,而造成停炉。所以 W 型火焰锅炉对于低挥发份煤是保证大容量机组安全,可靠,经济满发的重要措施。

作者简介: 郭晓宁,男,1933 年生,高级工程师。长期从事电站锅炉整体设计,燃烧设备设计及回转式空气预热器的设计及研究工作。主持 300 MW 机组,200 MW 机组锅炉燃烧设备设计及回转式空气预热器的研究工作。近十余年来,发表重要学术论文五十余篇。文中的文献[2]被列为华中理工大学历届动力工程博士、硕士研究生的重要参考文献。(通讯处:430070 武珞路 290 号武汉锅炉厂设计处)

6.6 诚然,对 W 型火焰锅炉燃烧装置的研究还有待进一步深入,并不断改进设计。但可以肯定其理论依据是充分的,运行是可靠的。

参 考 文 献

- 1 Annamalai K et al. A Theory on transition of ignition phase of coal particles. Combustion and Flame. 29. 1977
- 2 郭晓宁. 煤粉空气混合物的着火温度与浓度关系的理论分析和近似计算. 动力工程 1982.(2)
- 3 肖松林. 1160t/h 锅炉初步探讨. 华中电力. 1993.(4)
- 4 Л. А. 伏里斯著. 陈丹之译. 燃烧的热力理论
- 5 陆金荣. W 型火焰锅炉的发展和应. 武汉锅炉厂设计研究所 1991
- 6 池作和,岑可法等. W 型火焰配风方式的研究. 动力工程,1994.(3)
- 7 韩才元. 高浓度煤粉燃烧理论和技术发展现状. 电站系统工程,1993.(4)
- 8 庞丽君,秦裕混等. 侧向高浓度无烟煤粉燃烧技术的探讨. 热能动力工程,1994.(2)
- 9 郭晓宁. PM 型燃烧器设计分析及其在低灰熔点无烟煤煤粉锅炉炉膛布置中的应用. 电站系统工程,1993.(1)

(渠源 编辑)

山东将建核电站

据“Modern Power Systems”1995 年 9 月号报道,山东省已获批准,建设装机容量为 4000 MW 的核电站。该核电站将建在烟台或威海,将包含 4 台 1000 MW 的核电机组。前二台机组的工程预期 1998 年开始。

该工程项目第一阶段的初投资费用将是 48 亿美元。为了减少对烧煤电站的依赖,中国急于想建造更多的核电站。中国国家核电公司(CNNPC)已批准在浙江、广东和辽宁省建设核电站。江苏和海南岛也渴望建造核电站。

CNNPC 已经谈到,在 1996—2000 年的九五期间,中国要建造总装机电功率为 6800 MW 的 8 台核电机组。如果这一雄心勃勃的规划得以完全实施,则在 2010 年前核电站总装机电功率将达到 20000 MW。然后在接下来的又一个十年该功率将增加到 40 000 MW,占国家全部电站总装机电功率的 6%。

(学牛 供稿)

W 型火焰锅炉对低挥发份煤的适应性及其燃烧系统设计分析=The Adaptability of W-type Flame Boiler to Low-volatile Coals and an analysis of its Combustion System Design[刊,中]/Guo Xiaoning(Wuhan Boiler Works)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3):165~170

A detailed analysis is given of the main characteristics of low-volatile coals and some measures are proposed to properly organize the pulverized coal mixtures and the combustion system in order to meet stable ignition and high burn-up requirements. The W-type flame boiler can serve as an optimum candidate for attaining the above-mentioned aim. The design of the said boiler combustion equipment is also discussed. Key words: W-type flame utility boiler, low-volatile coal combustion

链条炉燃烧控制系统方案分析=Analysis of a Combustion control System Scheme for a Chain Grate Stoker-fired boiler[刊,中]/Liu Wenbin (Jiangsu Provincial Electric Power Simulation Technology Center)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3):171~176

The author analyses several existing combustion control schemes of chain grate stoker-fired boilers and proposes a simple-to-implement new scheme. The simulation test results have demonstrated the effectiveness of the said scheme. Key words: combustion control, chain grate speed, heat quantity signal, air/coal ratio

HG-130/3.82-Y₁ 型炉试运中配风器存在问题及对策=Some Air Register Problems Detected During the Trial Operation of a HG-130/3.82-Y₁ Boiler and the Countermeasures Adopted[刊,中]/Li Zhiwang (Heilongjiang Provincial Electric Power Testing Institute), Xu Zhongping (Cogeneration Power Plant of Mudanjiang Hualin Group Co.), Guo Xin (Heilongjiang Provincial Electric Power Development Co.), Li Handong (Yichun Forestry Electric Power Plant)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3):178~180

The present paper briefly describes the construction of a dual-channel swirl-flow type oil-gas air register for a HG-130/3.82-Y₁ oil-fired boiler. An analysis is given of the problems detected in the air register during the boiler trial operation. Also described are the countermeasures taken for solving the problems. Key words: oil-fired boiler, air register, combustion stabilization device

南山热电公司燃机燃用重油的经验=Nanshan Cogeneration Co. Gas Turbine Heavy Oil-firing Experience[刊,中]/Sun Shoulin(Shenzhen Nanshan Cogeneration Co. Ltd.)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996, 11(3):181~187

With the heavy oil price only about 60% of light oil price a multitude of gas turbine power generating plants are considering a switch-over to heavy oil. With regard to the reconstruction of existing light oil-fired power plants and the cost-effectiveness of reorientation to heavy oil the present paper attempts to give some guidelines for effecting such a conversion, including some basic information regarding gas turbine trial run on heavy oil. Key words: gas turbine, heavy oil firing, technical modification