

# 大型油页岩循环床电站锅炉运行性能分析

王 擎<sup>1</sup>, 郝志金<sup>1</sup>, 孙 键<sup>1</sup>, 秦裕琨<sup>2</sup>

(1. 东北电力学院 动力系, 吉林 132012; 2. 哈尔滨工业大学 动力系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:**介绍了 65 t/h 低倍率油页岩循环流化床锅炉的设计特点、总体结构、运行性能和测试结果。分析了油页岩电厂的经济和社会效益。测试结果表明, 锅炉总体性能先进。

**关 键 词:**油页岩; 循环流化床; 锅炉; 运行

中图分类号: TK229.6<sup>+</sup>6 文献标识码: A

## 1 前言

油页岩是吉林省最丰富的化石燃料, 现已探明储量多达 176.76 亿吨, 是全省常规能源资源总量的 1.4 倍。开发利用这一重要资源, 对于缓解吉林省能源短缺, 促进国民经济的发展具有重大的现实和深远的意义。

油页岩作为动力燃料用于发电、供热, 关键取决于其燃烧形式。根据国外燃用油页岩的经验, 采用煤粉炉燃用油页岩主要存在五大问题<sup>[1]</sup>: (1)油页岩需要被粉碎, 且制粉系统庞大, 易爆炸, 工作不可靠; (2)尾部对流受热面积灰、堵灰、腐蚀严重, 降低锅炉效率; (3)由于烟气温度高而引起燃料中碱金属升华导致炉内受热面高温腐蚀严重, 减少使用寿命; (4)需要辅助的脱硫设备, NO<sub>x</sub> 排放量高; (5)当油页岩发热值低于 8 373.6 kJ/kg 时, 需喷油稳燃, 致使运行成本提高。由于这些问题一直没能得到很好的解决, 所以很大程度上限制了油页岩电厂的发展。而采用流化床和循环流化床燃烧技术, 可以很好地解决上述煤粉炉燃烧油页岩所存在的问题。

东北电力学院 1992 年底开始承担原能源部“八五”重点科技攻关任务“65 t/h 低倍率循环床油页岩电站锅炉的研制”项目, 同时与东方锅炉厂和电力部西安热工研究院合作开发了 65 t/h 低倍率油页岩循环流化床锅炉。三台该型式的锅炉已安装在吉林省桦甸市油页岩示范电厂, 其装机容量为一台 6 000 kW 背压式和一台 12 000 kW 单抽式汽轮发电机组。该电厂 1 号锅炉于 1996 年 8 月一次点火成功, 现已有两台锅炉投入稳定运行, 第三台正在安装

之中。

65 t/h 低倍率油页岩循环流化床锅炉是我国自行研制开发的燃烧油页岩的循环流化床锅炉, 也是目前世界上最大的投运的油页岩循环流化床锅炉。1998 年 6 月国家电力公司和国家机械工业局联合召开鉴定会, 专家们一致认定: 该项目研究填补了国内空白, 总体性能居国际先进水平。

## 2 桦甸油页岩特性

油页岩是一种高灰份、高挥发份、低热值的劣质燃料。颗粒破碎后呈片状结构, 其片状颗粒的最大投影当量圆直径与其厚度比一般可达 5~10 左右。油页岩的流化燃烧机理与煤相似, 也有其特殊性, 即油页岩属高灰分燃料, 且其流化燃烧时易在未燃焦炭外形成灰壳, 限制油页岩焦炭的燃尽, 增加  $q_4$  损失; 另一方面油页岩具有较高的挥发份, 且挥发份只有一部分能在床中烧掉, 大部分要在燃烧室上部燃烧, 同时部分细小颗粒也将被扬析进入燃烧室上部空间继续燃烧, 所以应注重组织空间燃烧。桦甸油页岩硫含量较低, 属于低含硫量固体燃料, 而在油页岩灰中 CaO 的含量高达 12.44%, 所以在油页岩流化燃烧过程中有一定的自脱硫能力<sup>[2]</sup>。

## 3 锅炉特点

### 3.1 技术方案

针对以上桦甸油页岩的特性采用了下列技术方案开发出高效率低污染 65 t/h 低倍率循环床锅炉: (1)炉膛内自下而上实现等温低温燃烧(850 °C), 而这一温度既有利于脱硫又避免灰中金属的升华, 从根本上消除炉内受热面的腐蚀和尾部对流受热面的积灰、堵灰; (2)考虑到油页岩破碎后多呈片状结构, 而这种状态随燃料筛分范围的增加而严重, 因而确定筛分范围为 0~10 mm。此外, 为从根本上消除密

相床底部片状大颗粒的沉积和分层,采用了风帽型布风装置和较高的操作风速,小孔风速高达 50~60 m/s; (3)考虑到油页岩挥发份高的特点,为消除  $q_3$  损失,同时也为降低  $NO_x$  采用了较高的炉膛高度,且设有二次风和三次风,实现分段配风,分级燃烧; (4)针对油页岩灰分大的特点,为降低  $q_4$  损失,确定循环倍率为 6; 而为避免飞灰对受热面的磨损,在飞灰循环回路内的对流受热面烟气速度较低; (5)为了降低灰渣物理热损失,设置了风冷、水冷相结合的灰渣冷却器; (6)桦甸油页岩灰中 CaO 含量较高,可实现床内自脱硫,不必单设脱硫系统。

### 3.2 设计参数

额定蒸汽流量: 65 t/h  
 过热蒸汽压力: 3.82 MPa  
 过热蒸汽温度: 450 °C 给水温度: 150 °C  
 冷空气温度: 20 °C 燃料量: 6.52 kg/s

### 3.3 设计燃料

设计燃料为桦甸油页岩:  $C_{ar}$  为 20.4,  $H_{ar}$  为 2.54,  $O_{ar}$  为 9.82,  $N_{ar}$  为 0.505,  $S_{ar}$  为 1.015,  $A_{ar}$  为 54.82,  $W_{ar}$  为 10.9,  $V_{ar}$  为 80.7,  $Q_{net,v,ar}$  为 8473 kJ/kg。

### 3.4 结构特点

65 t/h 低倍率油页岩循环流化床锅炉为单汽包自然循环、半塔式室内布置、全钢结构炉架。

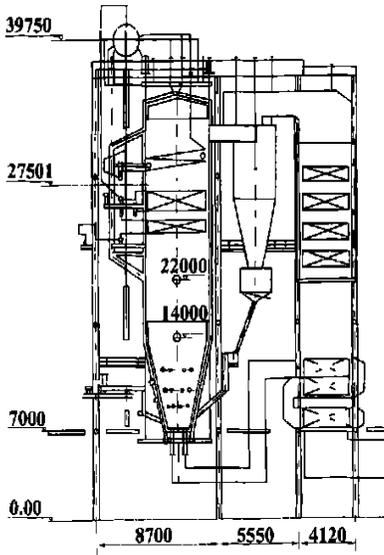


图 1 锅炉本体简图

锅炉本体除常规的蒸发受热面、过热器、经济器和空气预热器外还布置有旋风分离器、回料装置及冷渣装置等。锅炉炉膛四周由膜式水冷壁组成,炉

膛的下部为密相区、中间为稀相区、上部为对流烟道。过热器和蒸发段布置在对流烟道内,整个炉膛为全悬吊结构。锅炉尾部对流烟道内布置有经济器和管式空气预热器。炉膛与尾部烟道间布置有中温(525 °C)旋风分离装置及 U 型返料器。锅炉简图见图 1。

0~10 mm 的油页岩从炉前 4 个给煤点送入锅炉,一次风经炉底布风装置送入燃烧室内,二次风从锅炉侧墙分三段送入炉膛。燃烧室内的温度控制在 850 °C 左右。高温烟气夹带着燃料和灰粒通过炉膛上部对流烟道进入中温旋风分离器,被分离器收集下来循环灰经返料立管和 U 型返料器部分或全部送回燃烧室内。返料器由单独的高压罗茨风机控制,通过改变回料的送风量来调节固体颗粒循环量。为方便负荷调节在锅炉循环回路中还设有贮灰仓。离开旋风分离器热烟气进入尾部对流烟道,经经济器及空预器冷却后进入水膜除尘器,然后经烟囱排入大气。锅炉燃烧后的大渣由床层底部排出,通过冷渣器冷却到一定温度后排入灰沟。

## 4 锅炉主要运行结果

### 4.1 自脱硫特性

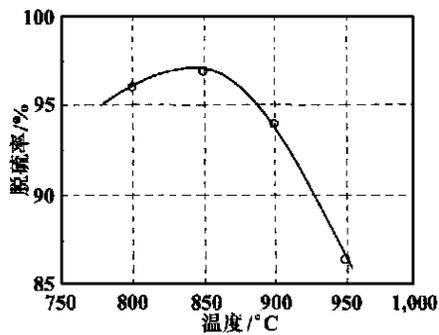


图 2 床层温度变化对脱硫率的影响

桦甸油页岩硫含量在 1% 左右,而在油页岩灰中 CaO 的含量为 12.44%,所以在油页岩流化燃烧过程中有一定的自脱硫能力。研究结果表

明,对于桦甸油页岩,在没有额外加入脱硫剂  $CaCO_3$  时,其钙硫比就已高达 5.32,这样在运行温度 850 °C 条件下,油页岩的自脱硫率可达到 96% 以上。因而可不必单设脱硫系统。图 2 为流化床床层温度变化对其脱硫率的影响。

### 4.2 点火启动

本锅炉采用油枪床上点火方式,即在锅炉布风板上方两侧墙上(距布风 1675 mm 处)装有两只点火油枪。点火启动时,先投入一只油枪加热床料,待床层温度达到 300 °C 左右时,再投入另一只油枪,当

床温升到 500 °C ~ 550 °C 时, 逐渐增加油页岩的投入, 直到床层温度达到 850 °C 时熄灭油枪。图 3 示出了锅炉冷态启动时床温及炉膛出口烟温的变化情况。

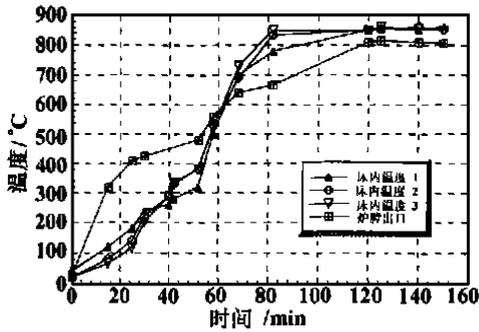


图 3 锅炉点火启动曲线

图中给出床层三条温度变化曲线, 其温度测点分别布置在炉前、炉后及炉右侧距布风

板 300 mm 的同一水平面上。从料层升温曲线上看, 400 °C 以下的料层升温较快, 几乎成直线上升趋势, 表现出床料吸热量很大, 温度上升较快。在 400 °C ~ 500 °C 之间床层温升加快, 说明床料中引子煤开始燃烧。500 °C 投入油页岩后, 床温开始急剧上升, 说明油页岩进入床层后立刻着火燃烧, 此时须增加一次风量控制床温上升速度, 以防止温升过快造成床内结渣。图示床层三个温度测点间的温度在相同时间时变化相差很小, 表明该锅炉在点火启动过程中床层温度变化是很均匀的。当床层温度达到 850 °C 左右时, 给煤投入正常运行状态, 锅炉达到稳定燃烧, 将左右油枪解列。另外, 炉膛出口温度在整个点火过程中逐渐上升, 并没有发生急剧变化, 说明该锅炉冷态点火启动特性很好。

4.3 过热汽温

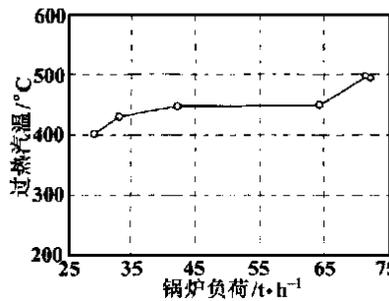


图 4 过热汽温随锅炉负荷的变化

过热汽温是锅炉运行时的主要技术参数, 维持稳定的汽温是保证机组安全和经济运行所必需的。汽温过高会使过热器所用金属的许用应力下降, 影响机组的安全运行, 而汽温降低则会影响机组的循环热效率。

65 t/h 油页岩锅炉布置了两级过热器, 在高、低温过热器间布置了喷水减温, 以修正锅炉运行因素对汽温波动的影响。

图 4 示出不同锅炉负荷下过热汽温的变化, 从中可以看到, 过热器出口汽温随锅炉负荷的提高而增加, 在 70% 和 100% 负荷工况下, 过热汽温达到设计值, 说明该锅炉的运行可保证过热汽温的要求。

4.4 再循环回路温度分布

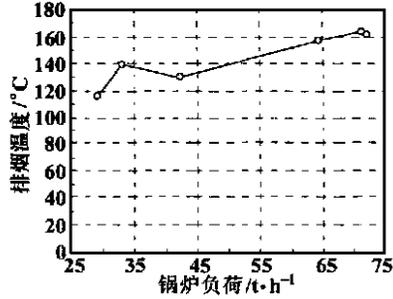


图 5 锅炉循环回路各部温度随负荷的变化

1—流化床; 2—炉膛; 3—高温过热器出口; 4—低温过热器出口; 5—分离器进口; 6—返料器出口

65 t/h 锅炉再循环回路各部温度随负荷的变化情况示于图 5。从图中可以看到, 再循环回路各部温度在低负荷时温度低, 高负荷时温度相应提高, 除了炉膛温度和返料器温度比前一部分温度有所提高外, 床层至回料器出口温度是依次降低的。这是因为在炉膛处由于有二次风的送入, 一部分可燃气体和固体颗粒在炉膛内继续燃烧, 造成炉膛温度高于床层。返料器出口温度高于分离器出口物料温度说明在返料器内由于有返料风的送入, 使得循环灰在返料器内二次燃烧, 从而使物料温度上升。图示 100% 额定负荷时的温度分布与锅炉设计计算温度比较, 两者数据基本吻合。

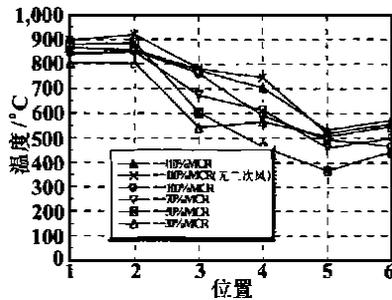


图 6 锅炉排烟温度随负荷的变化

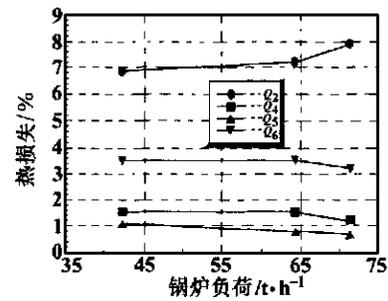


图 7 锅炉各项热损失随负荷的变化

锅炉排烟温度亦随锅炉负荷的增加而升高, 低负荷时排烟温度偏低, 这与低负荷时床层温度和经

济器给水温度偏低有关,但在 100% 负荷时锅炉排烟温度与设计值吻合,符合设计要求,该锅炉负荷变化对排烟温度的影响示于图 6。

#### 4.5 各项热损失随负荷的变化

对桦甸 65 t/h 油页岩循环流化床锅炉各项热损失的测定和计算,结果示于图 7。从图中我们可以看到,随着锅炉负荷的增加,排烟热损失随之增加,而其它各项损失在三种负荷工况下并没有太大差别,这是因为排烟损失主要取决于排烟温度,根据对各负荷下排烟温度的测定结果,锅炉从 70% 负荷到 110% 负荷运行时,排烟温度亦随之增加,这必然导致排烟损失的增加。

### 5 性能指标

1998 年 3 月上海发电设备成套所和吉林市环境保护监测站依据中华人民共和国国家标准对 65 t/h 油页岩循环流化床锅炉性能进行了测试,结果表明,锅炉可在 100% ~ 70% 额定负荷范围内稳定运行,锅炉易于调节,汽温汽压稳定。锅炉亦可在 30% 额定负荷下稳定运行,且具有 10% 的超负荷能力。各项参数达到设计值。表 1 给出了锅炉的主要运行结果。

表 1 锅炉主要运行指标

指标名称	设计要求值	实际达到值
锅炉额定出力	65 t/h	65 t/h
蒸汽参数	汽压 5.29 MPa 汽温 450 °C	5.29 MPa 450 °C
燃烧效率	≥97%	98.45% ~ 98.74%
锅炉热效率	≥85%	87.44% ~ 87.90%
二氧化硫排放	符合国家标准	92.22 mg/m <sup>3</sup>
氮氧化物排放	符合国家标准	82.94 mg/m <sup>3</sup>
排烟含尘浓度	符合国家标准	符合国家标准

### 6 经济效益分析

桦甸市热电厂燃用地产油页岩(发热值 7 118 ~ 9 630 kJ/kg),除发电外并对全市 110 万 m<sup>2</sup> 建筑物集中供热。1 号、2 号锅炉自 1996 年 10 月末相继投入供热发电,1996 年冬季,两台汽轮发电机组均未安

装完毕,锅炉只承担市区约 40 万 m<sup>2</sup> 建筑物供暖,年产值 572 万元。

1997 年冬至 1998 年春,背压式汽轮发电机组投入运行,供热发电,以热定电,产值 1 102 万元,利税 186.6 万元。1998 年 5 月至 1999 年 4 月,两台汽轮发电机组均投入供热发电,由于地产油页岩成本低,运距仅 10 公里,故进厂价 55 元/吨(发热值 7 200 kJ/kg)。折标准煤价 223.45 元/吨,要比省内其他燃煤电厂燃用黑龙江、内蒙运入的煤价 300 ~ 360 元/吨标准煤低 26% ~ 38%。因此,该厂发电成本低。夏天无供暖负荷时发电成本为 22.326 元/(kW·h),冬季热电联产(供 110 万 m<sup>2</sup> 建筑物采暖),发电成本 17.55 元/(kW·h)(发电成本包括设备折旧、还贷在内),而售电价为 42.27 元/(kW·h),毛利润 24.72 元/(kW·h)。产值 6 444.13 万元,还贷 1 577 万元,利税 1 267.33 万元。另外该厂投入运行后,年利用 23.5 万吨地产油页岩,安排就业人员 1 200 多人。

### 7 结论

吉林省油页岩资源丰富,已探明的油页岩储量为 176.76 亿吨。实践表明油页岩可以作为电站锅炉的燃料,是一种潜在的重要能源。锅炉在额定负荷时,汽温、汽压稳定,且易于调节。锅炉各项参数达到设计值。燃烧效率高达 98.45% ~ 98.74%,热效率 87.44% ~ 87.90%,均超过设计值。锅炉变负荷性能好,在 100% ~ 70% 额定负荷内,锅炉可在 30% 额定负荷下稳定运行,并具有 10% 的超负荷能力。锅炉启动特性好,污染物排放低,排尘浓度符合国家标准。65 t/h 锅炉的投运为桦甸创造了很好的经济效益和社会效益。

#### 参考文献:

- [ 1 ] HOLOPAINEN H. Experience of oil shale combustion in ahlstrom pyroflow CFB-boiler[ J ]. *Oil Shale*, 1991, 8(3): 194-209.
- [ 2 ] 姜秀民,王 擎,张靖波,等.油页岩循环流化床锅炉的设计与运行[ J ]. *动力工程*, 1998, 8(3): 22-28.

(何静芳 编辑)

503 ~ 506

On the basis of the first and second laws of thermodynamics and under constant heat flux conditions an analysis was conducted of the influence of fouling on the thermodynamic performance of convection heat exchange process in a tube. A criterion for evaluating such an influence is put forward, the so-called relative increment number of dimensionless entropy generation. Also discussed is the effect of parameters such as in-tube fluid Reynolds number (in the absence of fouling) and dimensionless heat flux density on the above-mentioned increment number. The results of the study indicate that the above criterion reflects not only the effect of fouling on the in-tube heat transfer process but also the effect of fouling on the in-tube flow process. It is noted that the entropy generation caused by the fouling layer heat conduction plays an important role in the total entropy generation of the in-tube heat transfer process. In addition, the study results have been compared with those of a tube with constant wall temperature. **Key words:** constant heat flux, convection heat exchange, fouling, thermodynamic performance

先进汽轮机准三维设计方法研究与流型分析 = **A Study of the Quasi Three-dimensional Design Method for an Advanced Steam Turbine and an Analysis of Its Flow Patterns** [刊, 汉] / ZHANG Dong-yang, JIANG Hong-de (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LI Jiu-hua (Jiangxi Electric Power Testing Research Institute, Nanchong, Jiangxi Province, China, Post Code: 330006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 507 ~ 509, 512

Presented is the development of a quasi three-dimensional design method for an advanced steam turbine. With a successfully modified 200 MW unit serving as an object of study the authors have performed the related analysis of its flow patterns. **Key words:** steam turbine, quasi three-dimensional design, flow pattern analysis

正交实验法在湿式烟气脱硫装置除水器实验中的应用 = **The Application of an Orthogonal Experimental Method in the Experimental Study of a Dehydrator for a Wet Flue Gas Desulfurization Unit** [刊, 汉] / QIU Zhong-zhu, ZHANG He-sheng, XU Ji-huan (Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 510 ~ 512

An orthogonal experimental method was employed to conduct the experimental study of the performance of a centrifugal dehydrator for a wet flue gas desulfurization unit. Through a variance analysis of the test data the effect of the various structural parameters of the dehydrator on water removal performance was ascertained along with an determination of the optimum structural parameters of the dehydrator. This had led to an optimum design of the latter. **Key words:** orthogonal experimental method, centrifugal dehydrator, dehydration performance, optimum design

大型油页岩循环床电站锅炉运行性能分析 = **Operating Performance Analysis of an Oil Shale-fired Circulating Fluidized Bed Boiler of the Highest Capacity Currently in Operation in China** [刊, 汉] / WANG Qing, HAO Zhi-jing, SUN Jian, et al (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 513 ~ 516

Presented are the design features, overall structure, operating performance and the test results of a 65 t/h oil shale-fired circulating fluidized bed boiler of low circulation ratio. The economic and social benefits of the power plant operating on oil shale were also analyzed. The test results show that the overall performance of the boiler has attained the advanced international level. **Key words:** oil shale, circulating fluidized bed, boiler, operation

汽轮机真空系统严密性试验的静态模拟计算 = **Static Simulation Calculation of the Air Tightness Test of a Steam Turbine Vacuum System** [刊, 汉] / LI Yong, DONG Yu-liang, YANG Shan-rang (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 517 ~ 519