

编者按:本期发表M·莫瑞尔先生等的“EGT在燃气轮机燃用灰分燃料方面的经验”一文。此文作者授权哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所所长闻雪友先生将该文译成中文在本刊发表,在此编辑部向作者及译者表示感谢。

该文详细论述了欧洲燃气轮机公司(EGT)在燃气轮机燃用灰分燃料方面的数十年的成功经验。介绍了燃油清洗和抑钒方法,严格控制燃气热通道中灰的化学组成和化学性质。在质量不等的各种燃油条件下积累的80万运行小时表明,只要设计合理、运行适当和维修及时,这种动力装置是可靠的。

该文由于篇幅过长,文中提及的附录I—V部分省略(I—各类石油的化学性质;II—燃气轮机燃烧室内的燃烧;III—灰的腐蚀性;IV—先进的高温燃气流道用材料及其工艺处理;V—镁基抑制。如读者需要查阅,请与编辑部联系。

## EGT在燃气轮机燃用灰分燃料方面的经验\*

[法]M·莫瑞尔 J.P.贾仲耐 J.P.维维柯西

固定式燃气轮机在发电领域内肯定将起日益重要的作用。除经济方面的考虑外,尚有造成现今这一确定无疑趋势的一些技术原因:

- 现代燃气轮机性能(功率和效率)的逐渐改进<sup>[1]</sup>;
- 燃气轮机应付日益严格的环境制约(NO<sub>x</sub>;CO;HC排放)能力<sup>[2]</sup>;
- 燃气轮机在电力应用上的多方面适应性(调峰机组;基本负荷联合循环;热电联供装置)<sup>[3]</sup>;
- 燃气轮机在燃料方面的灵活性;等等。

过去二十年间,全球石油资源呈现地区性集中,强烈地影响国际能源贸易。历次出现的“石油冲击”大大加速了消费者对低级油的兴趣。燃气轮机制造商抓住了这些动机的有利一面,发展了燃气轮机以灰分燃料运行的有效技术并验证这种发动机的可用性。

如今情况大有改观,天然气赢得了新电力项目中的极大部分的地盘,燃气轮机在燃用天然气的联合循环和热电联供装置方面已被推至前列。

但是在下世纪,能源的前景展望可能再次改观,这时煤气在IGCC装置中清洁燃烧将对电力供应提供一个长期的解决办法。在每种情况下,可用性和燃料灵活性都将保证燃气轮机在电力方面起着重要的作用。

实际上,尽管航空发动机及其派生发动机要依靠清洁燃气或馏出燃油运行,但重型燃气轮机可以使用种类广泛的燃料:

- 轻质碳氢燃料(天然气、液化石油气);
- 过程气体(焦炉气、炼油厂火炬气、煤伴生气)<sup>[4]</sup>;
- 石油蒸馏燃料(煤油、柴油、真空蒸馏油、石蜡油);
- 灰分燃料(原油、重油、混合渣油)。

收稿日期 1994 07 11

\*此文由 闻雪友先生翻译 男 54 教授级高工 150030 哈尔滨 77 信箱

## 灰份燃料引起的问题

含金属的燃料对涡轮元部件可能产生的影响是多方面的:

### ——对燃烧系统

- 燃料喷嘴被残碳物堵塞;
- 火焰筒因较高的燃气辐射率和在筒壁上可能结焦而过热。

### ——对涡轮及排气管

- 因微粒撞击而磨蚀;
- 因灰分沉积而结垢;
- 因冷凝硫雾引起的冷端腐蚀,等等。

### ——对辅助设备(泵、流量分配器等)的磨损)。

为了透彻地理解这些不利的因素,需要更深入地观察石油的一般化学性质和它们在燃气轮机中的燃烧过程。更详细的叙述见附录 I 和 II。

## 石油产品的性质

原油主要是以碳、氢作为主要元素[分别为(84—86)%和(12—14)%]的有机化合物的混合物。由于其来源于矿物,显示出在分子规格及结构上的无限性以及微(痕)量元素(S, O, N, P, V, Ni, Co, Fe, Na, K, Ca, Mg, Al, Si, Cu 等)的丰富多变性。

这些燃料 90%以上是由以烷烃族表示的实际碳氢化合物所组成,范围从可溶的  $CH_4$  到石蜡、环烷烃、芳烃和聚芳烃。

其它元素:氧、硫、氮、金属(钒、镍、铁等)虽然含量很低,但在原油和灰分燃油的一般化学性质中却是重要的。由于它们的沸点高,在提炼过程中它们大部分集中在“桶底”,使麻烦问题集中在重油上。

沥青烯具有高的分子重量(达 500 克/莫

尔),因此在电站进行输送时和在燃烧过程中均应严密注意。由于它们在碳氢基油中苛刻的可溶性,它们可絮凝和形成软的渣状悬浮物(图 1b)。此外它们还显示慢燃的性质。

钒、镍和铁是沥青烯分子的核心元素(图 3a)。原油中钒的浓度变化从几个 ppm(阿拉伯)到 1200 ppm(委内瑞拉),在真空残渣中可超过 5000 ppm。除了某些原油(印度尼西亚、中国、委内瑞拉)外,镍的含量是较低的。铅不是原油的正常组分,可能被偶然地引入燃油。

次要的非碳氢形式是水和悬浮固体颗粒。乳化水通常带有以氯化物或硫酸盐形式的碱和碱土金属(Na, K, Ca, Mg)。无机沉积物(沙、土、石膏、铁锈等)来自:

- 油田;
- 燃油运送和储存装置;
- 提炼过程(催化剂细粉)。

## 液体燃料的燃烧:

### ——一门复杂的科学

燃气轮机中产生的液体石油碳氢化合物的火焰完全不是简单的“ $CO_2 + H_2O$  的发生器”。首先,碳氢化合物燃烧不仅产生  $CO_2$  和  $H_2O$ ,而且还有  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  以及未燃尽的碳氢化合物和烟炱。

碱金属(Na, K)生成相应的硫酸盐。这些硫酸盐在 2200 C 以下是稳定的,但它们熔点比较低,在过渡段内它们以液滴形式通过。

沥青烯和树脂的燃烧主要产生  $V_2O_5$ ,可能还产生  $NiO$ 。酸性的  $V_2O_5$  的熔点很低,而且与硫酸钠一起生成易熔的盐。镍在火焰中氧化生成  $NiO$ ,但与  $V_2O_5$  相反,  $NiO$  表现为碱性并且不产生腐蚀性的副产物。

### EGT 控制腐蚀的基本观点

### 灰在热通道中的反应

热灰是非常活性的，产生几种腐蚀威胁。热腐蚀主要是两种形式，均与熔盐的电化学腐蚀有关：

——硫化腐蚀<sup>[5]</sup>。硫化腐蚀中的“入侵者”是碱金属和硫，它们形成低熔点的硫酸盐，硫酸盐熔解除层，腐蚀超级合金。图 2 表示这样一个严重硫蚀过程的示意图。

——含钒易熔物的腐蚀。钒生成三种有害的低熔点化合物： $V_2O_5$  (熔点 675℃)、钒酸钠和  $V_2O_5-Na_2SO_4$  低共熔物(图 3)。

腐蚀情况的详细讨论见附录 III。

过去几十年间，由于美国 GE 公司的先锋作用被 Alstom(现为 EGT, GEC ALSTHOM 和 GE 的合资企业)很快地追随，一项考虑所有这些制约因素的燃用重燃油的燃气轮机新技术已经出现。同时，由石油工业实践中派生的适当的燃油处理技术对充分地控制热腐蚀的风险是有帮助的<sup>[6]</sup>。

过去几年间已经发展了一个通用的方法，包括各种防范措施：

——基座上：抗侵蚀/腐蚀超级合金和涂层；经改进的喷嘴和燃烧室设计；限制燃烧温度，涡轮流道形状最佳化(防止因沉积引起过分的压降)等。

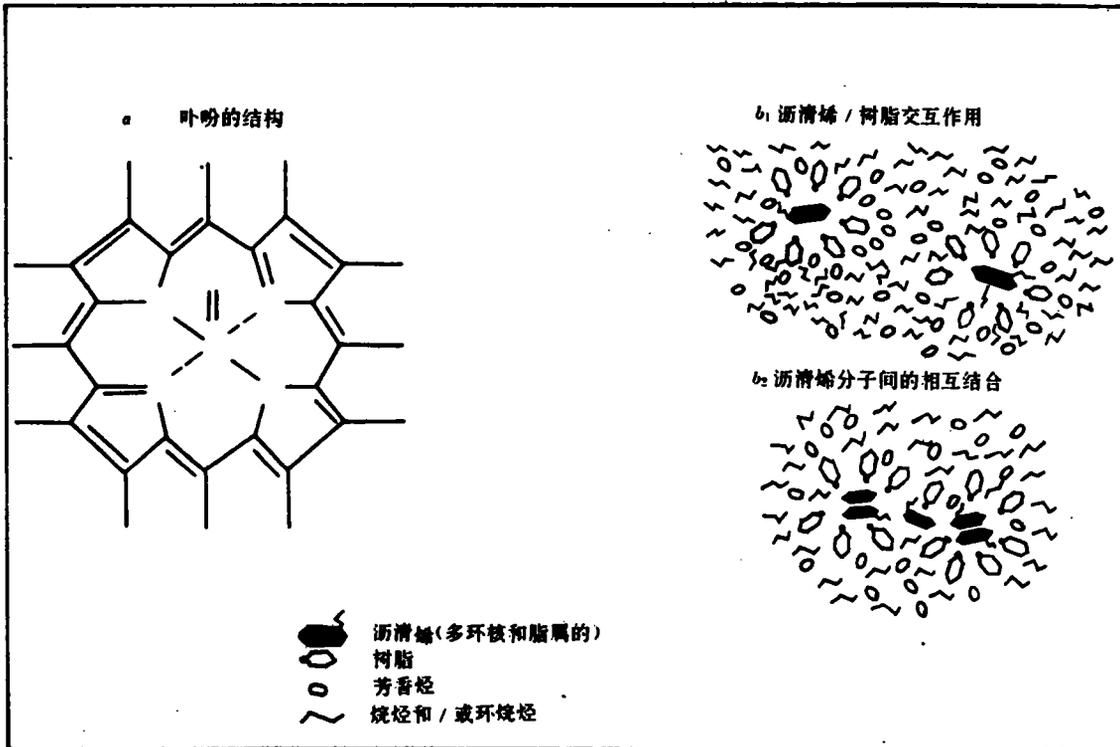


图 1. 燃油中的沥青烯

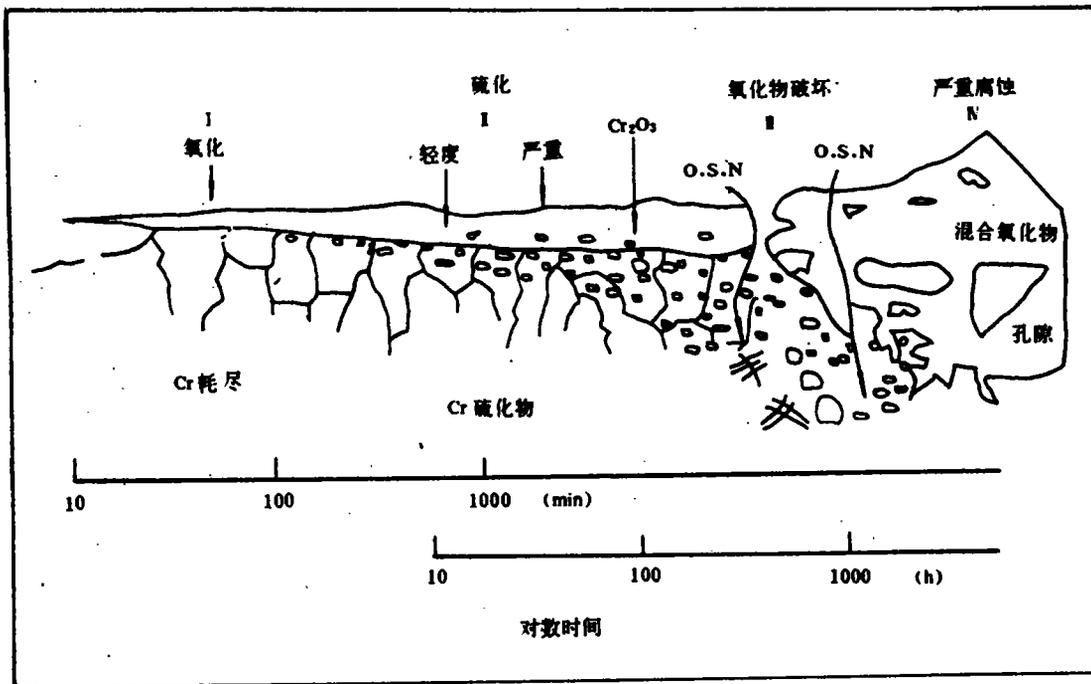


图 2 硫化腐蚀的机理

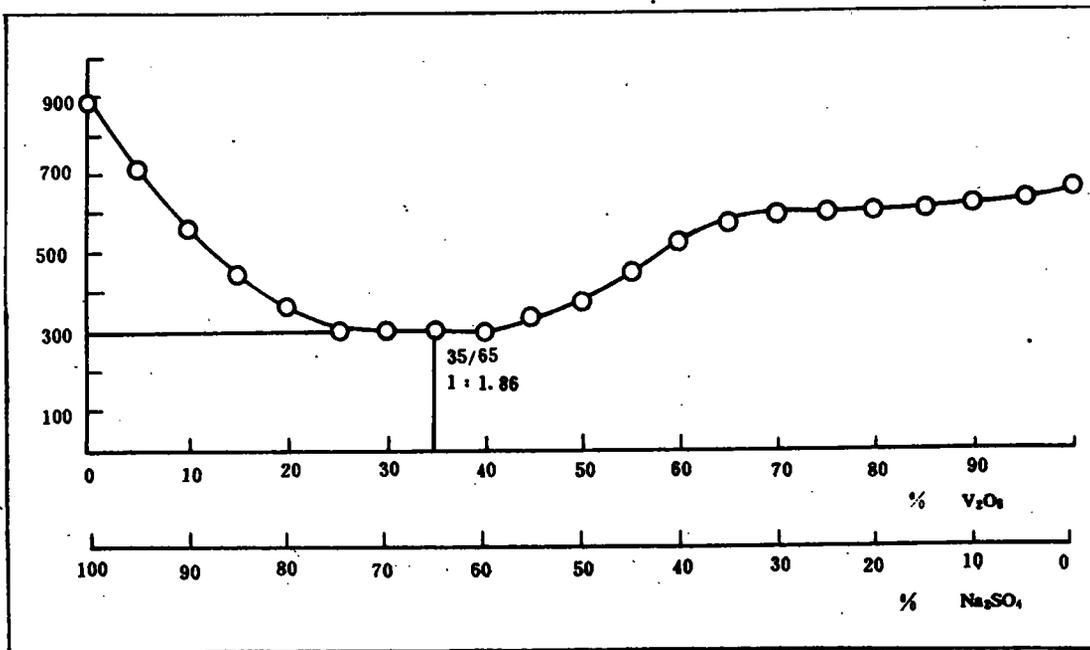
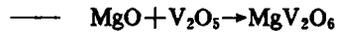


图 3 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 混合物的静摩擦温度



—— 严格控制燃油中的碱金属浓度( $\text{Na} + \text{K} < 1 \text{ ppm}$ ,按重量),如果必要,可用水洗燃料的方法来达到。有时也用铬基添加剂。

当钒含量超  $0.5 \text{ ppm}$ ,为防止钒腐蚀需用专门的抑制剂。在这方面,镁化合物很早就一直被确认为是种有效的“灰分改性剂”。在火焰的下游,镁与  $\text{V}_2\text{O}_5$  以一种类似于  $\text{Na}$  的方式发生反应,生成各种不同的盐或“混合氧化物”。



亚钒酸镁,熔点 =  $740 \text{ }^\circ\text{C}$



焦钒酸镁,熔点 =  $930 \text{ }^\circ\text{C}$



正钒酸镁,熔点 =  $1070 \text{ }^\circ\text{C}$

$\text{MgO}-\text{V}_2\text{O}_5$  平衡图见图 4。

当有足够过量的镁时,镁可以取代易溶的钒酸钠中的钠生成高熔点的、无害的盐(硫酸镁和正钒酸镁)。为了促进优先生成  $\text{Mg}_3\text{V}_2\text{O}_8$ ,镁的加入量必须超过相应于  $\text{Mg}/\text{V} = 0.72$ (按重量)的反应理想配比值<sup>[3]</sup>。实际上,如果考虑到由于不可避免地生成硫酸镁而造成镁的消耗,人们必须注入相当于正钒酸盐理想配比所需镁量的四倍,最终的  $\text{Mg}/\text{V}$  比大约是 3(按重量)。

除了少数的情况外,现在“3”这个比值已被广泛应用,因为它已被证明是充分控制钒腐蚀和限制灰分结垢的最佳剂量。因此,它已成为“人们认可的抑制值”<sup>[4]</sup>。

## 一体化的燃油处理装置

燃油处理装置用于完成燃气轮机用燃油的基本处理:

—— 把燃油加热到适当温度,以降低燃油粘度;

—— 滤除粒渣;

—— 洗除碱土和碱土金属;

—— 加镁基添加剂以抑制钒蚀。

按照燃油处理流程(泵送、水洗和燃烧室中空气辅助雾化),在各段有不同的粘度限制规定。当储存有沥青烯絮凝风险的“敏感”燃油时,必须避免过度加热和搅拌掺气。

过滤是一项紧靠着燃油处理装置的关键处理,因为微粒会引起各种潜在问题。它们可能损坏输送泵和低压泵的叶轮,高压泵的螺杆以及流量分配器的齿轮;它们可能侵蚀燃油喷嘴,使燃油雾化场发生畸变;过量的渣末还可能过早地引起油水分离器的堵塞;它们可能由于某种稳定油/水乳化物的能力而影响油水分离。有必要强调过滤器所起的“监督”作用,很遗憾,这个功能常常未被充分认识。

水洗时,碱和碱土金属通过均匀混合过程被转入水相。经稀化分散后的带盐水或借离心力去除,或借重力用静电力先凝聚成微水滴然后去除。通常需要多级分离。用低浓度的破乳剂( $5-50 \text{ ppm}$ )来加速分离。这种高新技术的表面活化剂吸附在液滴的界面上并使界面层脆化,它们也消解了原油的某些天然混合物的乳化效应。

在轻油、低钠沾染的原油或馏出油的场合,用一个离心分离器简单地脱水(或净化),通常足以得到符合规范的燃油。离心和静电分离器优缺点的比较见表 1。

图 5,6 分别示出了基于离心和静电分离器的典型的燃油处理装置图。

现在,镁添加剂的加入是用加药泵在线完成。现时,使用的是油溶性镁抑制剂而不是水溶性镁抑制剂(硫酸镁)或“镁悬浮物”(氢氧化镁),因为前者有明显的优点:高纯度、完全混合的能力、没有磨损破坏等。

表 1

参 数	静 电	离 心
1. 机理	静电	动力
2. 控制系统	半自动	全自动
3. 达到起动稳定的时间	4小时(每级), 12小时(总的)	总计 30分
4. 可靠性	好	好
5. 维护成本	很低	低—高速设备
6. 维修间隔期	一年	数月
7. 固体杂质去除	尚好—需要附加过滤	极好
8. 除渣	用废水排放, 但容器内可能沉积, 大致每两年需清理一次容器	用废水排放, 靠自动门打开
9. 最高运行温度	140~150℃(在压力下运行)	98℃(在大气压下运行)
10. 除 Na+K 的性能	如果燃油是在系统设计规定范围内, 则符合规范	如果燃油是在系统设计规定范围内, 则符合规范
11. 燃用高粘度燃油时的性能	好	好—增加装置数量
12. 废水中的含油量	典型的是 500 ppm 最大(起动时), 50 000 ppm	典型的是 50 ppm 最大 1 000 ppm(除门打开时)
13. 当燃料不符合水洗燃料规范时, 修正所需响应时间	几小时	几分钟
14. 运行中使用的灵活性	系统不能部分停运	在连续运行中, 如果安装有备用机, 离心分离器可以从使用状态中退出
15. 所需空间	需要大的面积	有限的面积
16. 安装方式	户外	户内或顶棚下
17. 噪声	极低(静的)	高(高速)
18. 水混合	剪切阀(小, 便宜)	滞留低速混合器(大, 贵)
19. 电耗	低	正常
20. 成本		
小系统 < 20 吨/小时	较高	较低
大系统 > 20 吨/小时	较低	较高
21. 最佳处理方式	连续	间断

### EGT 燃用灰分燃料经验之概述

1961 年 EGT 发运两台 Frame3 机组到阿尔及利亚,1972 年又有两台,均以未处理的原油运行,现在已积累了几十万的运行小时。

以后,EGT 已在世界各地安装了大量的用重质燃料的燃气轮机电站:

- 在中东:卡塔尔、伊拉克(原油);
- 在北非:摩洛哥(重油);
- 在亚州:巴基斯坦(混合重油)、中国(原油)。

表 2 中选录了三个最有代表性的燃用重油或原油的电站,并绘出了总的累计运行时数。

表 3 给出了几种原油和重油的主要性能,有些中国原油的特点是其含镍量要比含钒量高得多。

下述的讨论反映了 EGT 及其客户所获得的经验。试图给出“重质燃料”电站如何管理的初步方法。

为使这些装置安全运行需采取一系列能提供良好运行可靠性的预防措施:

- 精确的工艺过程控制,

表 2

国家/公用事业单位	电站	燃机型号/数量	燃 油	除盐设备	总运行时数 (至 1992.12)
摩洛哥/ONE	阿夏特 坦吉斯 坦吐恩	MS5001P/6	重油	静电	~180 000
中国/HIPDC	汕头 1	MS6001B/2	中国原油	离心	~50 000
巴基斯坦/WAPDA	柯特阿都	MS9001E/4	混合油	静电	~50 000

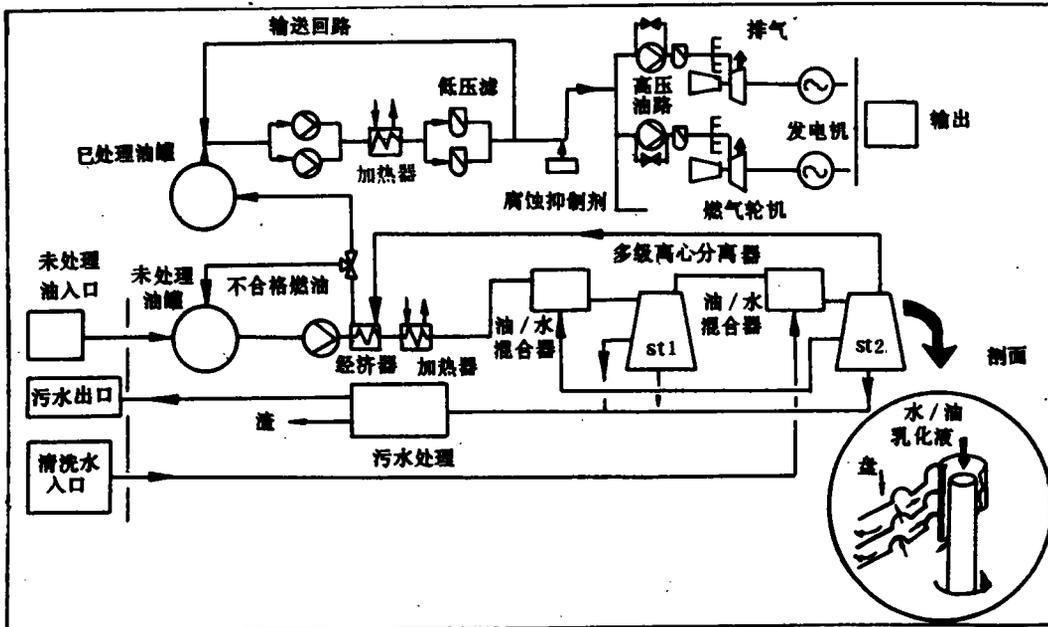


图 5 离心分离燃油处理装置

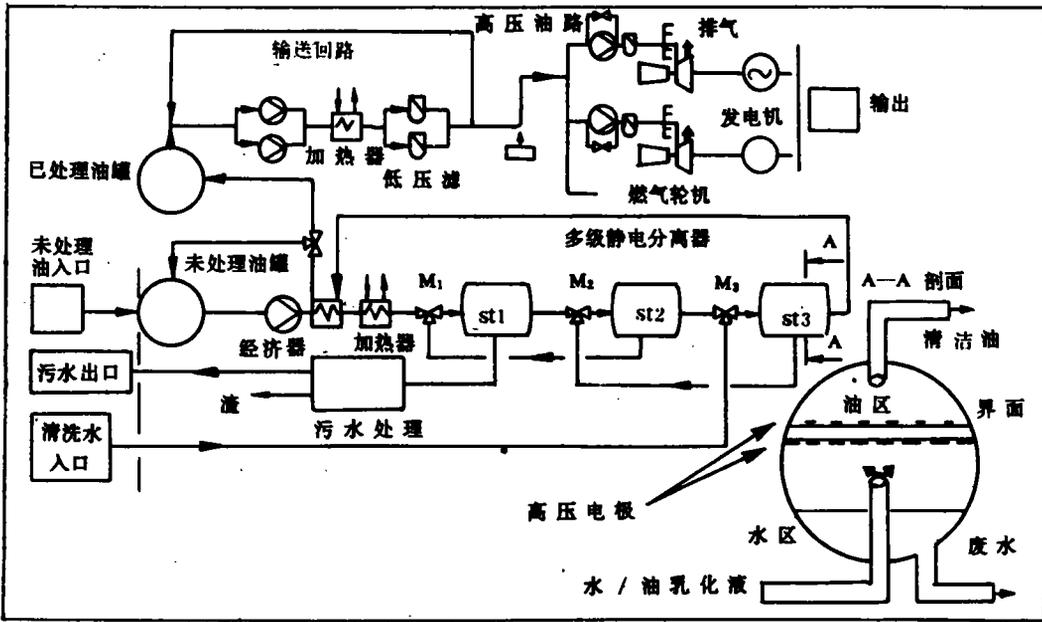


图6 静电分离燃油处理装置

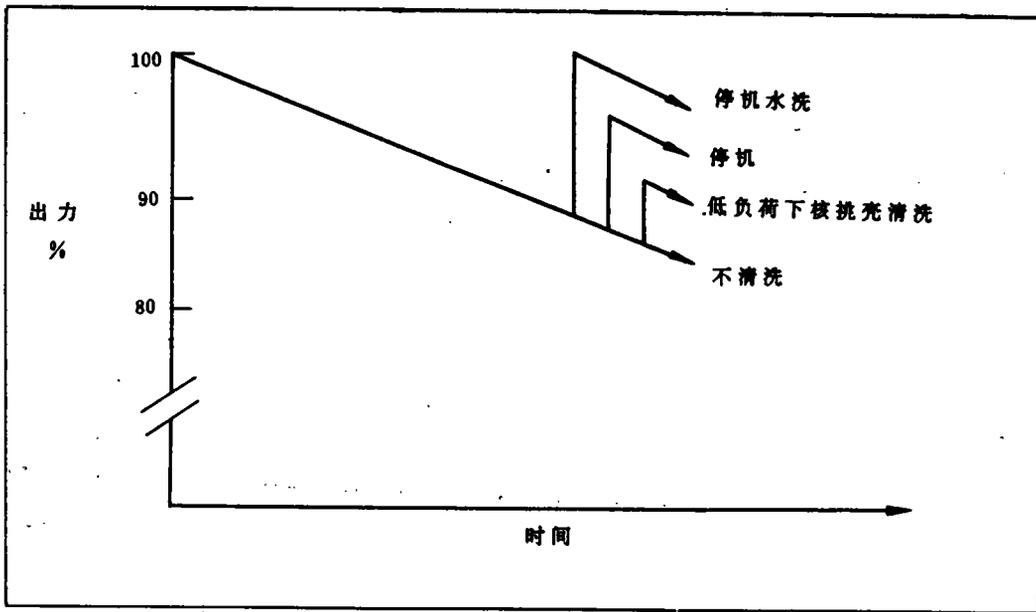


图7 重油:清灰的效率和清洗程序

—— 涡轮和燃油处理装置的细微的维修计划，  
 —— 对整个装置(卸油站、油罐区、污水处理装置等)的清洁服务工作。

由于重油的点火特性差,燃气轮机先用柴油起动,然后切换至重油。停机前则先切换至柴油,以免喷嘴、油滤等被粘性燃料堵塞。  
 燃气轮机的维修按 EGT 的标准检查计

划表(考虑了与燃用灰分燃料有关的“维修因子”),检查内容包括:

- 燃烧室检查;
- 燃气热通道检查;
- 大修。

在涡轮零件上的积灰使涡轮导向器通流截面积减小,涡轮气动效率下降,压气机压比升高,最终将导致压气机喘振,因此需要周期性的除灰。

表 3 某些灰分燃料的平均性能

电站地点	柯特阿都	阿曼特 坦吉斯 坦吐恩	汕头 1
燃油类别	混合油	重油	中国原油
比重(15℃)	0.923	0.942	0.905
粘度(cst)在 50℃	120	140	70.8
在 10℃	18	15	13.5
残碳量(%)	8.5	6.7	
沥青烯(%)	3	2.5	2
闪点(℃)	120	87	25
Na+K(ppm)	50~80	50	5~25
V (ppm)	3~50	65	1~5
低热值(kJ/kg)	40 850	40 750	41 000

现场经验表明有两种互补的除灰方法(图 7):

- 第一种,在发动机低负荷运行时喷入能轻度摩擦和易燃的材料(核桃壳清洗),可部分地恢复功率和效率。
- 第二种,在发动机停机并冷却后,用高质量的热来清洗,这几乎可保证完全恢复性能。

应该指出,在停机、再起动的多次循环中涡轮有某种程度的自清洁作用。这是由于硫酸镁的天然吸湿特性。在停机期,沉积物中所

含的上述盐吸湿,生成盐水化合物  $MgSO_4 \cdot xH_2O$  ( $x = 6$  或  $7$ ),而起动时它们经受突然脱水便成片剥落。

表 4 从第一级上收集的积灰的结构图的标样

X 射线 衍射信号	A	B*	C
主相	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ $Mg_3V_2O_8$	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ $NiSO_4 \cdot 7H_2O$	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ $Mg_3V_2O_8$
中间相		$MgNiO_2$	
痕迹相	$Ni_3V_2O_8$ $MgNiO_2$	$Ni_3V_2O_8$	

\* 镍是燃油中的主要金属污染物

运行期间,在燃油管线的几个关键点上进行例行燃油分析:

—— 对未处理的、经清洗和加抑制剂的油进行例行的钠、钾分析,以保证正确地去除碱金属。在油清洗系统工作不正常时,不符合标准的油将转到未处理油罐中,直到系统恢复正常工作。

—— 分析钒、镍和镁主要是适用于加抑制剂后的油。亦建议对卸油处或未处理的油罐的油进行钒和镍分析,因为由此可以检查出供油方面的任何变化,可事先做出工艺调整。

—— 水和沉积物的含量对泵、滤器、污水装置等是重要的,在油处理装置的各部位作分析。这种分析可提供在卸油站和储油罐的燃油的“清洁度”情况,和油水分离器的效率情况。

灰分的化学和结晶分析则是定期进行,以检验灰的改性处理是否正确地进行,也提供了对积垢化学的更好了解。

表 4 示出了某些分析结果。观察到的化学图形显示了  $MgSO_4$ ,  $MgO$ ,  $Mg_3V_2O_8$  等,这是与前面的讨论相一致的。从现场经验中也可了解或确认某些有趣的特点。例如,对灰垢的

严格考察证实了一种分层的  $MgO/MgSO_4$  结构(附录 V)。另一个例子是在含镍燃油中生成镍钒酸盐。

无论是制造商或用户,对于建立燃油和结垢分析的数据库都会饶有兴趣。

## 结 论

EGT 在燃气轮机燃用灰分燃料方面的基本观点是基于数十年成功的经验。观点的核心是用前述的燃油清洗和抑钒方法严格控制燃气热通道中灰的化学组成和化学性质。实际上,上述观点已为燃气轮机装置开辟了广泛的途径,据此,按燃用重质燃油进行设计的涡轮均可通过相应的燃油处理装置来输入燃油。

在质量不等的各种燃油条件下积累的 80 万运行小时表明:只要设计、运行和维修适当,这种动力装置是能够可靠运行的。

## 参 考 文 献

- 1 D. E Brandt, M. Colas. A new advanced technology 50 Hz gas turbine. ASME paper 90—GT 6338. 6/90
- 2 M. Moliere, M. Colas. Gas turbines in urban areas; Water/Fuel Emulsions to reduce NOx. GEC ALSTHOM Technical Review. 1991. No5. pp47—58
- 3 J. M. Bisseaud. Planners; Think Gas Turbines. Gas Turbines Congress. Cannes. 1988. paper AGTR 8806
- 4 B. Stambler. Gas turbine world. Nov-Dec 1991. pp26—29
- 5 F. D. Lordi Gas turbine congress. Deauville. 1984. paper No. 3
- 6 A. F. Bromley. Gas turbine fuel treatment; the Reasons Why. Petrolite pamphlet. 11. 89
- 7 P. W. Schilke, A. D. Foster, J. J. Pepe. Advanced gas turbine materials. GER 3569B. 10/1988
- 8 R. Greenlee. Vanadium Inhibition Orthodoxy. Petrolite pamphlet. 11. 89
- 9 C. Hergott Gas turbine fuels. Gas turbines congress. Cannes 1988, Paper AGTR 8805
- 10 J. Lucchini. Operation Experience with Crude. Heavy and Residual Oils. EGTA Library. paper EGT/M-JL 2802. 2/1992

附录 I—V (略)

## 新 产 品

### 液压力偶矩动力装置

将液压力对称地作用在一个装置上,产生的力偶矩使装置旋转,其特点是:与传统的动力装置相比,它增加了力偶臂,并且动力装置越大,力偶臂越长,越省力。与汽轮机相比最大的不同就是将高温高压的气体喷射改为液压力,同时液压力有将力放大的功能。

这种动力装置具有以下优点:

1. 当输出同样功率的扭矩时,作用力可以很小,这种动力装置与内燃机输出同样功率的扭矩时,液压力偶矩动力装置的输入功率是原内燃机功率的 1/10—2/10。力偶臂增加时,其输入功率还会进一步降低。
2. 使用能源为液压油泵和蒸汽。
3. 这种动力装置的作用力是对称的,因而转动件只受扭矩,而没有弯矩,且产生磨擦损失小。
4. 这种动力装置结构简单,零部件少,维修方便,不需要较多地维护和管理,容易控制,并可实施各种自动控制或管理。
5. 这种动力装置过载时能自动停车,适合于载荷变化较大或经常超载的场合,并在高温、潮湿、多尘的恶劣环境中,能保证安全可靠地工作。

(孙新建 供稿)

CONTENTS

- (250) EGT Experience with Gas Turbines Burning Ash-Forming Fuels.....M. Moliere, J. P. Gazonnet, J. P. Vinicersi
- (261) A Dynamic Mathematical Model of SK15HE Gas Turbine And Its Simulation by the Use of a Real-time Simulator.....Lu Zehua, Zhao Shihang, Xu fusheng (*Tsinghua University*)  
With SK15HE three-shaft gas turbine serving as an example the authors have set up a dynamic mathematical model for the real-time simulation of a three-shaft gas turbine. On the basis of the special features of the turbine control system a diagnostic detection is conducted of the gas turbine control system with the help of a real-time simulator, thereby solving the contradiction between simulation precision and simulation duration in a satisfactory manner. **Key words:** *gas turbine, mathematical model, real-time simulation*
- (269) Orthogonal Optimization Control of Boiler Thermal Efficiency..... Zhu Jianing (*Nanjing Electric Power Advanced Technical School*)  
Through a functional relation for calculating boiler thermal efficiency and by the use of a computation method in mathematical statistics an optimized parameter control value has been determined, which can lead to an enhanced boiler operating efficiency. **Key words:** *boiler efficiency, optimization control*
- (275) The Determination of NO<sub>x</sub> Content in Flue Gases of a 600 MW Boiler Installed at Pingwei Power Station and a Study on the Effectiveness of its Reduction..... Yuan Xiaobo (*Harbin Power Plant Equipment Design Institute*), Wu Banqiu (*Harbin Institute of Technology*)  
This paper describes the procedures for determining the NO<sub>x</sub> content in flue gases of boiler NO<sub>x</sub> installed at Pingwei Power Station. A secondary air swinging nozzle has been installed at the boiler top to reduce the NO<sub>x</sub> content in boiler flue gases. An analytical study on the effectiveness of such a method was also undertaken. **Key words:** *NO<sub>x</sub> determination, NO<sub>x</sub> reduction, boiler unit*
- (280) A New Method for Designing the Grate Firing Furnace Arch with a Highly Turbulent a-shaped Combustion Flame..... Huishien, Xu tongmo, Liu Zhongjun, Jiang Huishu (*Si'an Jiaotong University*)  
Through an experimental study based on furnace aerodynamics and hydrodynamic theory the authors have come up with a new method for designing a grate firing furnace arch featuring highly turbulent a-shaped combustion flame. When calculated on the basis of an aerodynamic and resultant momentum method, the resultant momentum of the front and rear arch should emerge within the range of  $2/3 \sim 4/5$  of the front arch straight section. When an intersection angle of  $\delta \geq 110^\circ$  with the front arch straight section is formed the coordination of the front