

轻型燃气轮机文集

(第一集)

航空工业部第八技术情报网

(一) 多种燃料在重型燃机及轻型燃机上的应用前景	
1. 多种燃料在重型及轻型燃机中的应用前景	(1)
2. 国内轻型燃气轮机燃用中、低热值燃料气和重油的探讨	(10)
3. 渣油在燃气轮机中的应用	(24)
4. 我国轻型燃气轮机燃用重质油和低热值煤气燃料的前景 及改型设计探讨	(36)
5. P 6 G 1 燃气发生器改烧低热值煤气后燃烧室改动方案的设想	(46)
(二) 提高燃气轮机热效率的途径与各种循环的比较	
1. 提高燃气轮机经济性的各种途径及其分析比较	(54)
2. 国外提高燃气轮机性能的途径	(63)
3. 航机的改造方式和用途浅析	(69)
4. 流化床——燃机联合循环概述及分析	(78)
5. 涡桨五系列燃气轮机在工业上的应用及发展	(90)
6. 燃机联供机组研制中有关燃烧等问题的探讨	(97)
7. 回热循环程氏循环分析计算	(106)
(三) 如何提高航空发动机改型机可靠性及保证燃机可靠性的调节监控系统	
1. 当前国外先进的调节监控系统及今后发展方向	(107)
2. 地面燃气轮机故障诊断与监控技术的若干问题	(120)
3. 轻型燃气轮机可靠性的保证措施	(128)
4. SM1A燃气轮机控制系统设计特点分析	(134)
5. 轻型燃气轮机材料的变化	(143)
(四) 航机改型的经济效益及国内市场预测	
1. 轻型燃机的经济效益及国内市场预测	(149)
2. 七十年代以来国外航机改型迅速发展的原因分析	(156)
3. 退役军用涡喷型燃气轮机陆用途径特点分析	(170)
4. 轻型燃机用于高速旅客列车与动车前景的探讨	(175)
5. WJ 6 G燃气轮机开发应用的前景	(186)
(五) 燃气轮机成套技术	
1. 轻型工业燃机的配套设备	(194)
2. WZ—6 G 1 燃机注水机组成套技术及组织方法	(203)

多种燃料

在重型及轻型燃机中的应用前景

刘高恩

一、国外轻型燃机使用原油、渣油及中低热值燃料的

研究状况

1. 概况及进展

原油、渣油及中低热值燃料，对于烧煤油、轻柴油或天然气的燃机而言，都是属于替代燃料。重型工业燃气轮机应用替代燃料的研究从五十、六十年代就开始了。而轻型燃气轮机应用这类燃料的研究，是近十年才迅速发展的，这和常规燃料（非替代燃料）领域中轻型燃机与重型燃机竞争已占有优势的趋势是相一致的。原因是轻型燃机的技术发展很快，它和航空技术的发展是密切相联的，可以很快把航空技术上的进步（例高增压比、高温与冷却涡轮）移植过来。另一方面，轻型燃机的优点是轻便灵活、占地面积小、维修周期短且方便，其缺点是价格高、对燃料要求高、寿命短。上述缺点通过研究正在不断地得到改善与解决，所以从国外情况来看，轻型燃机烧原油、渣油及中低热值燃料是发展的趋势，很快就将成为重型燃气轮机激烈竞争的对手。

原油和渣油用作燃机的燃料，其性质与出现的问题有所类似，只是渣油较为严重而已。

原油和渣油通常：①含有许多金属、特别是钠和钒；②含有许多残渣和水份；③比较重而稠。油中的钠和钒会加速高温腐蚀，并和其他物质化合后在燃气轮机内增大沉积物质形成的速率；水能在燃料系统内助长生物的生长和引起低温腐蚀，沉淀物在泵中会产生磨损、在过滤器中还会产生堵塞。

经过适当的燃料处理之后，可将使用原油、渣油时的热腐蚀控制到与使用馏份油时的腐蚀相当；由于处理并清除了水份及沉淀物，从而也避免了低温腐蚀及磨损。只是沉积问题比使用馏份油时仍然严重，且沉积也确实会堵塞燃料过滤器。

处理后的原油及渣油，在重型燃气轮机中是完全可以应用的。国外已有很多燃气轮机使用了原油或渣油，如G·E公司、Westing House公司、Alsthom公司、BBC公司，都出售这种产品。虽然，使用这类燃料要增加燃料处理方面的投资，且在维护及运行上有些附加支出，但总的燃料差价的净收益还是相当可观的，增加的投资费用在半年之内就可以偿还。所以原油及渣油在燃机中的运用还是具有吸引力的。当然，它的使用前景要受到燃料价格政策变化的影响，尤其是随着石油工艺的发展及化工原料的价格上升，原油、渣油的价格也会上升。从

过去总的实际使用情况来看,烧原油、渣油的重型燃机占有一定数量。GE公司的燃气轮机中有200余台是烧原油、渣油的。又如GE公司的联合循环(燃气轮机蒸气轮机联合循环)机组共有1亿小时的燃机商业运转时数,其中4百万小时是使用原油、渣油的。轻型燃机烧原油、渣油目前还没有商品化,但英国的R·R公司正在发展航改型烧原油、渣油的RB211型,美国的G·E公司正在发展航改型烧原油、渣油的LM2500型,并且已经接近商品化了。

中低热值燃料种类很多,应用于燃机的主要有:煤气、煤矿采掘气、油田采掘气、化工过程尾气、沼气、高炉煤气及炼焦炉煤气等。煤气的应用将在煤在燃机中的应用部分予以讨论。这里将主要讨论除煤气(煤气化燃料气)外的其他主要中低热值气体燃料的应用问题。

燃气轮机烧中低热值气体燃料,当然,首先考虑能烧天然气的燃机,即适当的加以修改,以适应烧中低热值气体燃料。Solar公司根据其烧 CH_4 为基的气体燃料得到如下的经验:对高热值气体燃料,一般只需修改燃料喷射系统;对热值在3000~4800大卡/标 M^3 的中热值燃料,需对燃烧室及喷射燃料系统作修改;但对热值在1600~3000大卡/标 M^3 的中热值燃料,其涡轮工作受到一定的影响及限制;对小于1600大卡/标 M^3 的低热值气体燃料来讲,燃烧室及涡轮必须作修改设计。Solar公司的经验对于以 CH_4 为基的中低热值气体燃料是适用的。但对于以 H_2 为基或含 H_2 多的中低热值燃料来讲就不再适用,因为 H_2 的绝热当量火焰温度高、化学反应快、且稳定范围宽。按G·E公司的经验,气体燃料中若含有10%以上的 H_2 (容积百分数),则组织燃烧就相对容易。

总的来说,烧中低热值气体燃料的重型燃机,国外的发展水平和烧原油、渣油的发展情况有些类似,即对于重型燃机来讲已经商品化了(热值低到850大卡/标 M^3),而轻型燃机烧中低热值气体燃料也在大力发展,并已接近商品化了。

轻型燃机应用原油、渣油及中低热值气体燃料在国外是发展方向之一。在和重型燃气轮机的竞争中,已表现出其优势,可以预料轻型燃机将是重型燃机强有力的竞争对手。

2. 遇到的主要技术问题及解决方案

燃机在用原油、渣油作燃料时,所遇到的主要技术问题,可以归纳为三方面:(1)对燃机零件的腐蚀;(2)燃机内的结垢;(3)组织燃烧困难。渣油与原油相比其品质更差,对燃机造成的问题也更严重。下表系两者之间的差别:

燃料特性	馏份油	原油	渣油
沉积物及水(%)	0.03	0.3	1.0
灰分(ppm)	10	100	1000
钠+钾(ppm)	0.5	5.0	50
钒+铅(ppm)	0.5	30	100
粘度、厘沱, 20℃	6	30	500

解决上述问题的办法主要有二方面:一是燃料(原、渣油)的净化处理;二是从燃机着手。

燃料的净化处理方法,主要是离心过滤处理及静电处理两种(见输油管道译丛85年3—4期)。对于渣油来讲,通常需要多级处理,使杂质降低到燃机所能允许的含量(通常钠和钾的含量允许为1 ppm)。典型的离心过滤处理系统为MOP×210型(在阿拉伯联合酋长国的

LAin, 它和西屋电气公司的W251型燃机相配合)。静电除尘器中, Petrolite公司生产的系统已广泛用于净化原油及渣油, G.E公司、Westing house公司、Alsthom公司及Brown Boveri公司都采用这种系统与其燃机相配套。

原油、渣油中主要有害杂质为三类: 水溶性杂质、油溶性杂质及固体杂质。水溶性杂质是钠、钾和钙, 它们对结垢及高温腐蚀都有很大的影响。见表1。

表1 平均结垢速率、腐蚀效应与含Na量及涡轮前温度 t_3^* 的关系

平均结垢速率(%/100小时)					腐 蚀 效 应			
渣油 含Na (ppm)	$t_3^*(^{\circ}\text{C})$				渣油含 Na (ppm)	$t_3^*(^{\circ}\text{C})$		
	816	871	927	982		760	871	982
1.0	1	2	3	4	U—500材料0.1	0.06	0.14	0.48
2.0	2	3	4	6	1.0	0.24	0.34	0.90
5.0	3	5	8	12	10.0	4.8	7.5	14.0
10.0	5	9	13	20				

燃机对燃料中水溶性杂质的要求:

$$\text{Na} + \text{K} < 1 \text{ ppm} \quad \text{Ca} < 10 \text{ ppm}$$

第二类杂质为油溶性杂质, 即钒、镍和铁的铬化物, 这些物质会使燃机热部件产生灾难性的腐蚀, 而这些杂质又很难消除。公认的解决办法是加入镁基化学药剂, 抑制钒的腐蚀作用。因镍和铁的含量较低, 不需要进行特殊处理。第三类杂质是固体微粒, 一般燃机对燃料固体杂质的粒子直径要求小于5微米。(注: 经处理使钒在燃油中含量小于2.5ppm)。

为使燃机适应烧原油、渣油, 必须在燃油系统、燃烧室设计及清理涡轮沉淀物等方面采取措施。

喷射燃料系统要对燃料预热, 使燃料粘度降低到 $30 \times 10^{-6} \text{米}^2/\text{秒}$; 采用空气雾化喷嘴, 机械——空气喷嘴或切向槽面积可调喷嘴, 以便得到好的雾化而防止积炭、积焦(特别在低工况下); 要有合理的喷雾锥角与燃烧室相适应; 采用优质材料(例3Cr13、硼化处理)制造喷嘴, 以防磨蚀; 尽量减少燃料中水分。

燃烧室方面的措施: 合理控制燃烧区空气量, 以保证在低工况下燃烧区的温度大于 1000°C ; 加长燃烧室, 以保证燃料在燃烧室内有足够的燃烧时间; 保证火焰筒有较高的温度(低工况下) $400 \sim 450^{\circ}\text{C}$, 使积炭和积焦能自动烧掉; 或采用变几何燃烧室(美国通用汽车公司Allison燃气轮机分部)。

涡轮部件, 一般采用涂层保护的办(MCrAl_y合金涂层)。更为先进的方案是采用复合涂层, 底层为MCrAl_y, 外层为经过稳定化处理的ZrO₂(外层主要起隔热作用)。

清除涡轮沉淀物的三种方法：水清洗、自动清洗和坚果壳清除法。自动清洗是指设备停机后重新启动过程中，涡轮机件上的沉淀物自然剥落；水清洗是指停机期间用水冲洗涡轮沉淀物；坚果壳清除法，是运行中在涡轮与燃烧室之间的通道内，周期的注入坚果壳。清除这些沉淀物，能使燃机功率输出得到恢复。

美国Solar公司控制杂质含量的要求如下：

固态粒子总质量 $\leq 30 \text{ ppmw} \times \text{LHV (Kcal/kg)} / 11945$

粒子最大尺寸不超过 10μ

大部分粒子（含总质量90%）的尺寸不超过 5μ

硫（S） $< 1.0\% \text{ wt} \times \text{LHV} / 10195$

钒（V） $< 0.5 \text{ ppmw} \times \text{LHV} / 10195$

Na + K $< 1.0 \text{ ppmw} \times \text{LHV} / 10195$

其它（Hg、Pb、Ca、Mg） $< 1.0 \text{ ppmw} \times \text{LHV} / 10195$

式中LHV是低热值（Kcal/kg）

除控制燃料杂质外，还必须考虑空气中含有的杂质及水蒸气（用以降 NO_x ）中的杂质含量，所以总的杂质含量，可以用当量杂质含量来控制，其表达式为：

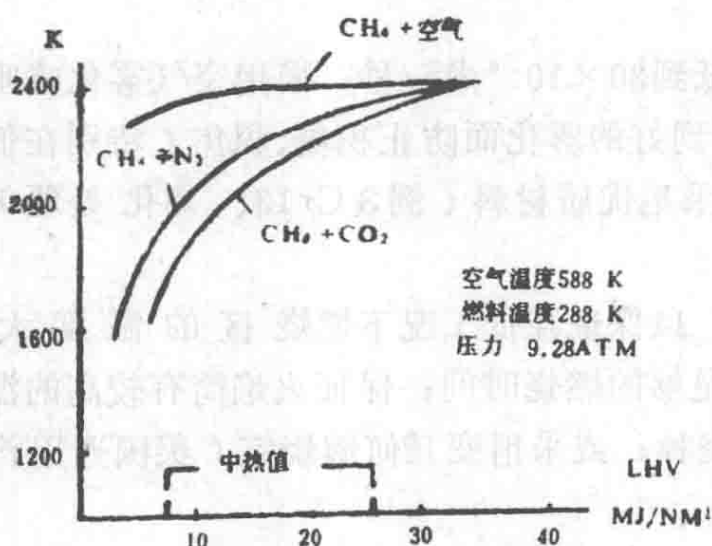
$$X_e = [(A/F)X_a + (S/F)X_s + X_f]$$

式中： X_e ——当量杂质含量， A/F ——指空气与燃料量之比， X_a ——空气中所含杂质， S/F ——水或水蒸气流量与燃料流量之比， X_s ——水或水蒸气中杂质含量， X_f ——燃料中杂质含量。

应该控制 X_e 小于上述所说的各项指标。

其他技术问题，是有关燃烧及涡轮的问题。

首先是燃料的绝热当量温升。中低热值燃料的绝热当量温升高（从图中可清楚地看到）。 ΔT_{adst} 表示燃料的绝热当量温升（指与空气反应）， ΔT_{adst} 低不仅影响组织燃烧而且影响整个热力循环。通常 ΔT_{adst} 超过 1833°C 不会有多大问题。如果燃料的绝热当量温升低于 1833°C ，可采取以下措施：a、修改火焰筒的流量分配， ΔT_{adst} 可降到 1500°C ；b、采用部分预混火焰， ΔT_{adst} 允许降至 1000°C ；c、用燃机排气余热来予热空气及燃料，可使 ΔT_{adst} 降至小于 1000°C （即给Brayton循环补充能量）。



其次是燃料的火焰传播极限（富限及贫限）及燃烧稳定范围。通常需要计算或实验（G·E公司专门有个小装置）确定燃料的火焰传播极限，这对中低热值气体燃料的燃烧是至关重要的。根据经验，如果富限/贫限的值大于2.8，稳定及启动一般都没有多大问题。如果小于2.2，须要改进燃烧室主燃区的火焰稳定。

另一个技术问题是因为燃料热值低，为保证同样的功率输出，在主燃区必须供应大量的燃料，因而引起主燃区的流速增加及喷

咀设计等问题, 轻型燃机尤为严重。所以燃料在喷咀出口处的喷射速度, 应该控制在一定的范围, 一般认为, 以CH₄为基的燃料(中低热值气体燃料), 应该控制在150~180M/sec。但是, 对于含H₂高的燃料, 采用旋流式方式喷射, 其喷射速度可高达250~270M/sec。当然速度高会带来另一个问题, 即燃烧室内压力脉动量高, 引起燃机零件的振动过大。控制稳定性的措施有: 加大火焰筒直径, 加强涡流区强度, 一次燃烧区富油, 预热燃料及采用高热值燃料的值班喷咀等。另外, 由于热值低而需要大量的气体燃料(低热值燃料量有时可占空气量的15~20%), 这样会引起涡轮部件通过能力不够, 对此可以修改涡轮设计或从整个系统想办法(例Chang Cycle用压气机放气到煤气发生炉中)。

烧中低热值气体燃料, 还会遇到点火启动问题, 一般可用双路燃料喷咀来解决。点火启动时用高热值燃料, 正常工作用中低热值燃料。也可以直接用中低热值燃料点火启动, 但燃料中必须含有较高的H₂量(如G·E公司LM500, LM2500)。

中低热值燃料的排气污染(NO_x及CO)亦需控制。如果主燃区反应温度低于1600K就会生成大量CO, 所以要控制主燃区的反应温度。NO_x的生成量可以如下估计:

$$\frac{NO_x}{NO_{xCH_4}} = 1 + \left[10 \ln \left(\frac{T_f}{T_{fCH_4}} \right) \right], \quad \frac{T_f}{T_{fCH_4}} > 0.915$$

因此对于含H₂及CO高的燃料, 即使其热值较低, 但由于其反应温度高, 也能生成较高的NO_x, 加入水蒸气能够有效的抑制NO_x的生成及帮助CO的燃烧。

其它技术问题, 有温度分布(出口)、效率、材料壁温及温度梯度。烧中低热值燃料时, 效率会下降, 出口温度分布会变坏。效率的问题, 取决于反应速度及停留时间。对反应速度低的燃料(CO反应慢), 需要有较长的停留时间(加长、加大燃烧室)。而对含H₂量较高的燃料, 由于H₂的反应快而不必加长、加大燃烧室。典型的LM500轻型燃机燃烧室, 长度为170mm, 烧含20%H₂量、热值为1000~1500kcal/NM³的燃料, 仍能保持高效率及合理的温度分布。由于燃料热值低、反应温度低、及辐射热小, 因此, 壁温一般不会遇到问题(一般比烧天然气要低)。

3. 实际使用情况

原油、渣油已在重型燃机上得到了实际运用。其例子很多。

如: GE, MS5001P	(原油), 沙特阿拉伯
GE, Frame 5	(原油), 委地瑞拉
西屋V—501B	(渣油), 美国佛罗里达
Alsthom Frame 5	(渣油), 摩洛哥
Brown Boveri 11	(渣油), 台湾

轻型燃机LM2500及RB211已基本完成了试验工作, 但尚未投入实际使用。

重型燃机烧中低热值燃料的例子:

瑞士	BBC公司	高炉煤气(850kcal/NM ³)
日本	三菱公司	高炉煤气
美国	Solar公司	采掘气(油田)(3000kcal/NM ³)
澳大利亚	GT35B型	矿井瓦斯(14MW)

英国 CX350—KB5 采掘气(油田)

附带说明一下,英国的这一套采掘气(Landfill gas)发电装置的投资,将于2.6年内收回。发电量约为3.6兆瓦。

轻型燃机烧中低热值燃料在国外尚未投入使用,如:RB211, LM500, LM2500已完成研究工作。

二、国内轻型燃机使用重油及中低热值燃料的探讨

1. 国内资源情况及轻型燃机应用重油、中低热值气体燃料的可行性

重油目前的生产量约为全部油量的 $\frac{1}{3}$,而价格又很便宜。轻型燃机应用重油,技术与经济上都是可行的。但随着石油加工业的发展,重油价格会相应提高,利用重油来加工化工原料,肯定是发展的方向。将来大规模应用是困难的。然而石油的加工,总会留下小部分重油,至少在相当一段时间内,轻型燃机的发展是值得的。

炼厂气(干气)、伴生气都属于高热值气体燃料,热值为7000~9000大卡/ NM^3 。

采掘气是一种中热值气体燃料,热值为3000~4000大卡/ NM^3 ,其主要成分是 CH_4 ,这是在油田开采过程中的填坑内搜集起来的。这是一种废气,而且有危险性。所以应该清除掉,燃机利用这种燃料发电是很合理的方案。英国估计有600个可以提供(英国国内)这种气体而适合于发展小型燃机的场所,而投资约在2.6年即可收回(投资约为200万英镑,包括净化系统,发电3.63MW)。

化工部门主要是化肥厂,尤其是小化肥厂(我国有2000多家),其生产过程中有两种废气可以利用。一种为合成二气,热值约3300大卡/ NM^3 ,主要可燃成分为 H_2 及 CH_4 ,这种燃料对燃机而言是一种理想的燃料,但随着化工流程的进一步现代化,其过程中所释放的合成二气量就会减少。另一种是放空气,热值为700~800大卡/ NM^3 ,主要可燃成分为 CO 。还有一种可以在燃机上应用的燃料是半水煤气,热值为1800~2000大卡/ NM^3 ,它不是废气,用在燃机上就需计入一定的燃料费。但我国不少缺电区域的化肥厂,用这种半水煤气作为燃机的燃料来发电,在经济及技术上也是可行的。

煤炭部门中,钻井开采现场也有中低热值气体燃料可供利用。富气矿中,中热值气体燃料的热值为3000~4000大卡/ NM^3 。贫气矿中的热值为1600大卡/ NM^3 ,主要成分均为 CH_4 ,富气矿中的气体燃料,在轻型燃机或重型燃机中应用是完全可能的(国外已经用了,国内也准备引进)。贫气矿中,因为热值低且不含 H_2 ,在轻型燃机中应用比较困难。开采现场还有一种含 CH_4 只有1%的通风气,在轻型燃机中更难应用。

冶金部门的高炉煤气及炼焦炉煤气,也是中低热值气体燃料。炼焦炉煤气的可燃成分为 H_2 及 CH_4 ,热值达4550大卡/ NM^3 ,是理想的燃机燃料,但燃料需压缩加压才能输入燃机。高炉煤气的主要可燃成分为 CO ,热值只有840大卡/ NM^3 ,所以不能在轻型燃机中应用。另外高炉煤气中含有焦油类凝结物质,进燃机前必须净化。

2. 国内的研究进展情况

烧重油和原油方面,南方公司和608所做了大量的工作,从燃烧室调研到整机运行都作了详细的研究。主要解决的问题是燃烧后的积炭、积焦。燃料方面,首先用净化系统来处理,并确定了相应的处理规范。燃烧室方面,设计准气动雾化喷嘴,调整了旋流器流通面积及各火焰筒环套的长度及重叠量。整机通过了启动和运行试验,已证明寿命可达1500~2000小时,87年年底重油燃机机组将在机车上进行运行试验。

其他单位,如南京搞了自备电站方案,准备引进MS6001燃机及重油净化装置,但这属于重型燃机。

中低热值气体燃料的应用刚刚开始,86年北航及614所在达旗化肥厂进行了WZ—5燃烧室(轻型)的全环形常压试验。原计划,在燃烧室方面主要修改喷嘴及涡流器,模拟设计了几套喷嘴,已确定三种喷嘴都可以满足燃烧性能的主要指标(按烧煤油的性能要求定),并且没有修改涡流器就达到了目的。在扇形试验器上的试验表明,这种以 H_2 、 CH_4 为主的燃料,只要 H_2 的含量(容积)高于12%,轻型燃机的燃烧室就可以很好的组织燃烧。按照计划,87年年底或88年年初,将在达旗化肥厂进行WZ—5的全台试验。

三、煤在燃气轮机中的应用

1. 国外的进展情况

煤的应用包括两方面,一是煤的气化,然后在燃机中燃烧;另一种是直接烧煤或煤水浆。总的来说,煤在燃机中的应用是肯定的,也是当前国际上能源利用的重大课题。远在30年代德国及美国就进行了尝试,并且在铁路机车上进行了应用。遇到的主要问题是:叶片的侵蚀及硫化物的腐蚀,后来都停下来了。二十年前美国又进行了燃机直接烧煤的试验,也是由于涡轮沉积、侵蚀及腐蚀而告失败。近年来由于各方面技术的发展,美国能源部确认开展煤在燃机中应用的课题在技术上是可行的。这是因为:①燃机部件的改进技术,涡轮冷却技术的改进,有助于控制腐蚀及沉积速率;②煤制备技术的发展,可以经济地制备 15μ 以下的煤粉,且把灰分和含硫量控制在0.8%以下;③常压及增压硫化床燃烧器的发展。近几年,在美国能源部(D.O.E)能量技术中心(METC)的组织领导下,对煤在燃机中的应用进行了有计划的研究。该计划主要考虑的燃料对象,是煤水浆及煤气化煤气。计划包括基本技术数据,系统及经济分析,部件及系统技术等方面。

燃煤的燃机(直接燃煤),目前还处于研究阶段,煤气化煤气在燃机中的应用主要是IGCC方案(Integrated Gasification Combined Cycle)。IGCC投入运行的有德国Luenen及美国加洲的冷水工程,德国Luenen的已停,只剩下美国的冷水工程。

煤的发展及其在燃机中的应用,无论从能源利用及经济性来讲,都是很有吸引力的。经济性分析,对其发展及方向是有很强制约作用的。特别是煤的液化或气化成清洁燃料,需要付出相当大的投资。经论证得出:除非这些费用能降低到U.S. \$5.45/10⁶大卡,否则在经济上不会有多少好处。

2. 技术上的主要进展

a. 煤油浆及煤水浆

已从技术上解决了制备及贮运的问题，在燃机上应用的关键问题是：对涡轮叶片上的沉积、浸蚀及腐蚀的控制；对煤水浆中灰分清除或燃烧产物中灰分、除硫的适当结合；及燃烧室的点火、稳定及喷嘴磨损。

涡轮叶片上沉积，会改变流动方向，效率降低甚至引起喘振。粘结不牢的沉积，可用周期性的注入坚果壳来清洗掉（注入的果壳量约为燃料量的50%），但粘结牢的沉积，只有拆开才能清除。试验表明，强烈的冷却（用水冷）使表面温度大为降低，有助于控制沉积和腐蚀。另一种解决方案是采用陶瓷材料做叶片（对小型燃机）。

点火及稳定的问题基本上能解决，但稳定范围不如烧油的宽。只有喷雾比较细，可使燃烧效率达到0.98~0.99。为使NO_x排放达到工业燃气轮机的要求，常采用二级燃烧方案。

煤水浆燃烧室，可采用排渣式和不排渣式两种方案。

燃机对煤水浆的要求是超净化、超细磨及低硫量（灰分低于1%，平均尺寸为10μ，含硫量低于0.5%）。这就使煤水浆的制备成本增加很多。因此也要从燃机设计方面着手，常从燃烧室排渣、涡轮前除灰、除硫及耐腐蚀涡轮部件的采用来降低对煤水浆的制备要求。

煤水浆喷嘴技术是另一个关键问题，一是煤水浆的粘性高，需要在高粘性下有很好的雾化；二是有效的控制煤粉颗粒对喷嘴表面的磨蚀。解决方案可为：①组织多层次空气雾化喷嘴，例Porkin Hannifin的方案，降低煤水浆的速度，增加雾化空气速度，且采用多道雾化空气。②旋转杯雾化方案（浆的速度可降到每秒几十厘米的量级。③预蒸发预混合方案，即把煤水浆加热，成为裂介了的固体煤粉、挥发物、水蒸气、空气的混合物，再送到喷嘴。

b. 流化床（常压、增压）的进展情况及有关问题

煤气发生炉有多种型式：固定床、流化床、气流床、熔渣池式。固定床（Fixed Bed）式以鲁奇炉为代表，作为IGCC的一部分鲁奇炉装置的典型，是西德Luenen斯蒂克电厂。燃机发电7.4万千瓦，汽轮机发电9.6万千瓦。70年代开始运行，供电效率为31.7%（原设计为36%）。目前已停止运行，主要是堵塞问题及竞争力差（效率低），上述鲁奇炉的排渣方式为固体。英国研制了液态排渣式鲁奇炉，其气化强度大、效率高，水蒸气需量小，投资约比固体排渣式少15~20%。缺点是后处理系统复杂，且需加助熔剂，对炉衬材料要求高，目前尚未在工业上应用。

流化床（Fluidized Bed），可分为常压及增压式两种。常压流化床已经商品化了，增压式流化床是近期发展起来的，预测增压式要比常压式更为有效。估计这几种型式的Btu/kw·hr分别如下：固定床9860，常压流化床9640，增压流化床为8200~8470。从发电成本计算，以美国为例每年mills/kw·hr分别为86，77，67~74。美国能源部专家小组认为：增压式流化床用于IGCC可能是有前途的。需要解决的技术关键是：跨过压力层的固体运动、燃烧器、热气清洗系统、热气导管系统及燃气涡轮。

常压流化床，可以温克勒炉作为代表，主要缺点是气化效率低，只有60%左右。增压式流化床，可以高温温克勒炉（HTW）及（KRW）炉（回流式炉）为代表，这两种炉子已经进入商品化阶段。我国机械工业部已与KRW公司签了合同，引进KRW炉。

气流床（Entrained Bed），典型的Texaco炉，也进入商品化阶段了，我国化工部和Texaco公司也签了合同并已引进。

熔渣池式气体发生炉，只处在开发阶段，效率（气化）为50%。

3. 国内外的研究情况

燃气轮机烧煤,在国内尚处于研究阶段。需要解决煤处理的经济性及燃机的技术性问题。北航正在从事这方面的开发和研究工作,包括燃烧(点火、稳定)及燃烧产物对燃机的影响。国外主要是美国G·E公司,在研究主要的技术措施,采用水冷却涡轮。

煤的气化燃料是一种低热值气体燃料。热值为1000~1500大卡/ NM^3 ,这是指用空气的气化炉。如果加入 O_2 ,热值就可高达2200~2500大卡/ NM^3 。其主要是应用燃机发电的方案(IGCC方案),此方案的主要优点是效率高(可高于50%),且较好的解决了环境污染问题,技术上也基本成熟了。通常采用重型燃机(例GE的MS6001)。但IGCC的主要问题是煤气的净化需要相当高的投资,力求减少投资,改善经济性从而提高竞争力,是IGCC进一步发展的关键。

另一方面,美国也在研究粗煤气的应用,(Raw Gas)以尽量降低煤气净化的要求,同时提高燃机对煤气杂质的承受能力,来减轻投资及成本的压力。

我国也开展了燃机应用煤气发电的可行性研究,上海成套公司与GE公司合作进行了论证(可行性)及燃烧试验。近期,航空部有关单位也正在进行FT-8的IGCC方案的论证。

有关经济性的研究,应当注意国外的发展趋势和方向。

参考文献

1. CHigier编 煤的燃烧与应用 北航出版社
余如山、候术玉译
2. 输油管道译丛 85年3—4期
3. 焦树建 燃气轮机燃烧室 机械工业出版社
4. 张斌全 现代航空燃烧室 北航出版社
5. Development and Application of Industrial Gas Turbines For Medium Btu Gaseous Fuels ASME 85-GT-28
6. Development of a Gas Turbine Combustion System For Medium Btu Fuel ASME 85-GT-98
7. Cool Water Cool Gasification a Progress Report
ASME 85-GT-55
8. Combustion Characteristics of the GE LM2500 Combustor
With Hydrogen-Carbon Monoxide-Basic Low Btu Fuels
ASME 85-GT-179
9. Design and Development Test of a Heavy-Duty Industrial Gas Turbine
Combustion System For Low Btu Cool Gas Fuel ASME 85-GT-45
10. Gas Turbine Wored 87.VOL、17 Nol
86.May—June
86.March—APril

国内轻型燃气轮机燃用中、低热值

燃料气和重油的探讨

张宝诚 张惠芬

摘 要

本文论述了中、低热值燃料气的来源及其成分，热值对燃气轮机的影响；较详细介绍了燃料气系统及双燃料喷嘴。重点论述改烧中、低热值燃料气时燃烧室的主要改进，讨论了改烧这些燃料气的燃机流体力学、燃料与空气的混合、火焰温度、稳定极限及可靠性；简述了运用流化技术使重油汽化的轻型燃机燃烧方式。

作者认为应大力开展烧中热值燃料气，特别是气化煤的燃料气的轻型燃机试调工作，并提出应寻求烧低热值和烧重油相结合的轻型燃机燃烧部件再设计方案的设想。

一、概 述

在过去的25年，燃气轮机作为工业泵、压缩器和发电原动力装置用，均已获得相当大的发展。就工作效率、可靠性和维护性而论，亦积累了引人注目的经验。采用燃气轮机后，循环性能和总经济性都有明显的改善，因此，这促使市场上的需求量获得极大增长。

由于节能已是世界范围普遍注意的大问题，因此探讨燃气轮机改烧劣质燃料、中/低热值气体燃料具有重要意义。美、日、比利时、瑞士和西德等国都在积极研究燃气轮机烧煤技术，并已取得一定的成果。

燃气轮机烧煤主要有两条途径。一是将煤气化，制成煤气；二是将煤粉碎，制成水煤浆。从发展来看，煤的气化研究和应用是主要的〔1〕。

最早实现以煤气化的低热值气体为燃料的是苏联的ГТ-12-3燃气轮机发电机组。它是在煤矿中进行煤地下气化，并于50年代末期投入运行发电。很显然，由于煤的储量占矿物燃料总储量的80%以上，因此用煤气化获得的低热值气体推动燃气轮机发电，将是本世纪最有发展前途的发电系统。

中、低热值气体的另一个主要来源是冶金和石油化工厂。某些装置的排气或尾气含有可燃成分，并具有一定的压力和温度。若把这种低热值气体引进燃气轮机，将获得很高的经济效益。瑞士BBC公司于1949年运行了世界第一台烧用低热值焦炉气和高炉气的燃气轮机发电机组。美、英、德也先后利用催化裂化炼油尾气运行燃气轮机〔2〕。

冶金工业中高炉炉顶气压力为2—3.5个大气压，温度50℃以上，简略估算给出，1500米³的高炉余压气可用来发电3000KW。日本于70年代设计成轴流反击式燃气轮机发电机

组，已有29台可靠地投入运行。

烧煤气的商业化典型燃机是威斯汀豪斯 (W·H) 50—1—GT—1型，功率为20万千瓦。更有前途的是增压流化床燃烧结合小型燃气轮机。第一台是加利福尼亚门洛帕克燃烧动力有限公司的装置。该装置为绝热式，即它不装设床内冷却管。通过烟气净化减少涡轮叶片的磨损〔3〕。

运行小型燃气轮机的第二家公司是新泽西·伍德——里奇的柯蒂斯——赖特 (CW) 公司。他们在七十年代中期曾获得一项美国能源研究所和发展局的合同，建造并运行了13MW的中试装置，以空气加热循环为基础组成联合循环发电系统。

很显然，烧用中低热值气体燃料带来的好处，一是拓宽了燃气轮机燃用燃料的范围；二是利用了废物，具有明显经济效益；三是保护环境，减少污染源；四是燃气轮机的设计改动少，便于实现。

重油的燃烧也可同烧中、低热值气体的试验、设计结合起来，只不过亦应使重油气化，增设重油气化装置。

二、中、低热值燃料气的分类和来源

1. 分类和定义

表1列出了气体燃料的分类。这五种不同的燃料气体将需要不同的处理方法、不同的燃烧和控制系统。当热值低于标准热值时，燃烧系统就必须进行尺寸再设计，而且还可能需要采用标准天然气进行起动和停车，以及瞬载运行。

表1 气体燃料的分类

级别	类 别	低 热 值 MJ/nm ³	燃烧系统	起动停车	载荷 限制
1	液化天然气 (NGL) 液化石油气 (LPG)	>63.0	工作范围宽 (烧天然气)	相同	不需要
2	高热值燃料气 (HBG) 标准天然气	23.63—63.0 31.50—47.26	控制系统调整 基准设计	相同	不需要
3	中热值燃料气 (MBG)	7.88—23.63	修改燃烧室； 新燃料喷咀 新控制系统	用高热值气体或 高热值液体起动 (或可能相同)	瞬载 限制
4	低热值燃料气 (LBG)	2.95—7.88	修改燃烧室； 新燃料喷咀 新控制系统	用高热值气体 或高热值液体 燃料起动。	瞬载限 制或不 加负荷
5	超低热值燃料气	<2.95	新设计燃烧系统 催化燃烧	相同 自持系统	低瞬载

各种气体燃料源定义如下:

(1) 石油和气体工业的燃料气

典型成份为 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_3H_6 、 CO 、 H_2 及 CO_2 等。其热值从1.18变化到118 MJ/nm^3 。主要来源为原生天然气、液化石油气、氮气分离厂的天然气、炼油厂废气、三次油回收的废气、渣油气化气等;

(2) 加工工业燃料气, 诸如高炉气 ($2.76-4.73\text{MJ}/\text{nm}^3$); 尿素、塑料、化肥加工厂产生的氨; 焦炉煤气 ($11.8-21.7\text{MJ}/\text{nm}^3$); 炼钢厂、化工厂和炼油厂的气体付产品或余热蒸汽〔4〕;

(3) 煤矿坑气 ($19.7-31.5\text{MJ}/\text{nm}^3$);

(4) 固体燃料气化产生的燃料气;

(5) 低热值煤气 ($2.95-7.88\text{MJ}/\text{nm}^3$);

(6) 中热值煤气 ($7.89-19.7\text{MJ}/\text{nm}^3$);

(7) 合成天然气 (由煤、油页岩、柏油砂和其它碳素物在三次气化过程发生器中制造的);

(8) 生物量产生的燃料气 (提供了占世界能量需求量的8%〔5〕)。工艺方法包括直接燃烧, 热气化和厌氧菌致分解——如液体污物, 水果蔬菜罐头厂的残余物, 动物和庄稼废物, 藻类等)。

这种处理过程生成可燃气, 其成分包括甲烷、二氧化碳和空气, 其低热值在13.8至23.6 MJ/nm^3 。

2. 煤的气化方法

目前, 煤的气化方法主要有两种, 固定床式炉和流化床式炉〔6〕。

适应燃气轮机运行的流化床式气化器的简单流程如图1所示。这种流程或用蒸汽与再循环气体混气可以使气化器流化。

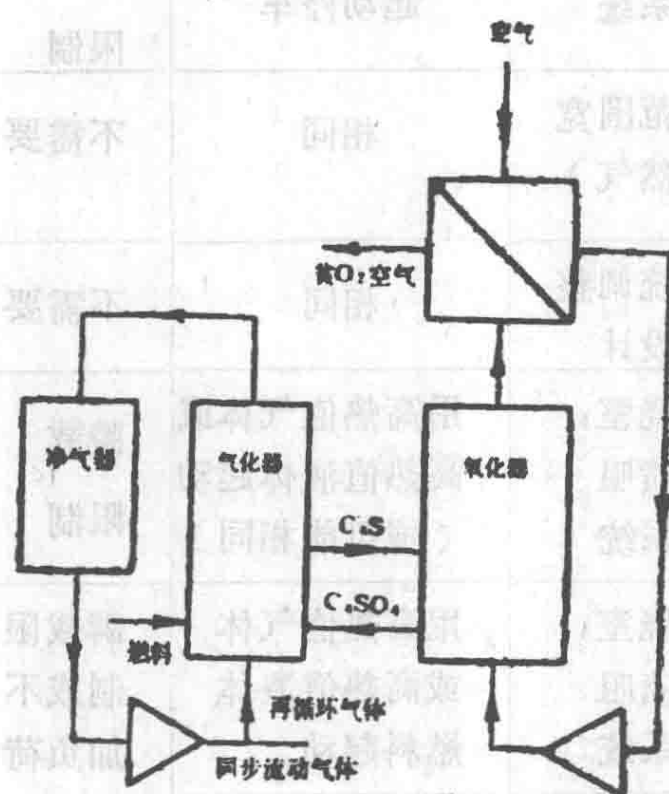


图1 流化床氧载体气化器

煤的气化包括四个基本反应: 氧化、气化、氢化及挥发过程。

3. 重油的气化方法

图2示出一种气化重油 (渣油) 的简化流程〔7〕。其主要的控制问题是宽广范围的气体流量通过气化器时要维持两个反应器之间的压力平衡。为了方便, 气体被排入使其烧烬的氧化器。应用色谱仪分析气体产物, 通过巡回检测器监控气体流量和温度。在相同运行状态下, 化学活性流化床气体一般被脱硫到约80%的程度。产生的气体量将与燃料特性、气化器温度和再循环比有关, 最终产物是一种脱硫气体, 可在燃气轮机中直接燃烧。

4. 燃料气成分对燃气轮机的影响

的影响

燃料气的成分和浓度对于燃气轮机能量转换过程的空气动力——热力学——化学特性均有影响。涡轮寿命和循环可以受到某些成分的影响。安全的输送燃料气和燃气轮机的可靠运行也取决于燃料气的实际特性。排气中高的 NO_x 排放物可能要求喷水，以控制 NO_x 来满足排放物的规定。燃烧各种气体燃料时热 NO_x 排放物与燃烧 CH_4 的 NO_x 排放物的比可用下式估算：

图2 氧载体气化中试装置简图

$$\frac{\text{NO}_x}{\text{NO}_{x\text{CH}_4}} = 1 + \left[10 \times \ln \left(\frac{T_f}{T_{f\text{CH}_4}} \right) \right] \quad \text{对于} \quad \frac{T_f}{T_{f\text{CH}_4}} \geq 0.914 \quad (1)$$

$$\frac{\text{NO}_x}{\text{NO}_{x\text{CH}_4}} < 0.1 \quad \text{对于} \quad \frac{T_f}{T_{f\text{CH}_4}} < 0.914 \quad (2)$$

式中， T_f 为火焰温度。

表2列出主要可燃成分的性质，表3列出这些燃料特性对燃气轮机运行的影响。安全操作和可靠运行取决于实际燃料的特性；该表指出，这些燃料特性影响燃气轮机运行的各个方面。其中有一个很重要的设计参数，即气体Wobbe（渥勃）指数的变化应控制在10%，

$$\text{渥勃指数} = \frac{\text{LHV}}{\text{WI}} = \frac{\text{MJ/nm}^3}{\sqrt{\text{M}_{\text{gas}}/\text{M}_{\text{空气}}}} \quad (3)$$

式中LHV——燃料气的低热值； M_{gas} 、 $\text{M}_{\text{空气}}$ 各为燃料气和空气的分子量。

燃料气的输送、控制和喷射系统的调整与尺寸再设计，均需保证良好的燃料混合和稳定的控制。燃料气容积流量比随渥勃指数减少而稳定升高，表明所有燃料含有成分对尺寸再设计任务影响的大小〔图3〕。

三、燃料气系统的主要改进途径

由于中、低热值气体的发热量较低，为了保证燃气轮机的负荷要求，即保证燃烧室出口温度 T_3^* 值达到设计值，供给燃烧室的燃料气容积流量就要比天然气的流量大8—10倍，因

表2 燃料气中主要可燃成分的性质

参 数	单位	可 燃 成 分					
		H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
分子量M	—	2.016	28.01	16.04	30.07	44.10	58.12
低热值LHV	MJ/nm ³	10.8	12.6	35.8	63.8	91.4	119
	Kcal/kg	28.655	2.413	11.947	11.342	11.072	10.925
$WI = \frac{LHV}{\sqrt{M_{gas}/M_{air}}}$	MJ/nm ³	40.9	12.8	48.1	62.6	74.0	83.9
$Rr = WI_{CH_4}/WI$	—	1.18	3.75	1.0	0.77	0.65	0.57
$Rm = \frac{(Kcal/kg)CH_4}{Kcal/kg}$	—	0.42	4.95	1.0	1.05	1.06	1.09
LFL低火焰稳定极限 (25℃, 1atm)	%V _{OL}	4.0	12.5	5.0	3.0	2.1	1.6
UFL高火焰稳定极限 (25℃, 1atm)	%V _{OL}	75.0	74.0	15.0	12.4	9.5	8.4
$RFL = \frac{UFL}{LFL}$	—	18.75	5.92	3.0	4.13	4.52	4.67

表3 燃料特性和燃气轮机运行

对燃气轮机的影响 燃 料 性 质	涡轮匹配 的影响	控制系统 的影响	循环 的影响	燃烧 过程	排气中 排放物	寿命 及维护	安全性 及 可靠性
分子量	0	0					0
低热值	0	0	0	0			
化学当量比温升		0	0	0	0		
火焰稳定极限		0		0	0		0
反应速率				0	0		0
水蒸汽含量		0	0	0	0	0	
污染度		0			0	0	0
生成化合物的排放					0	0	0
爆震极限		0		0			0

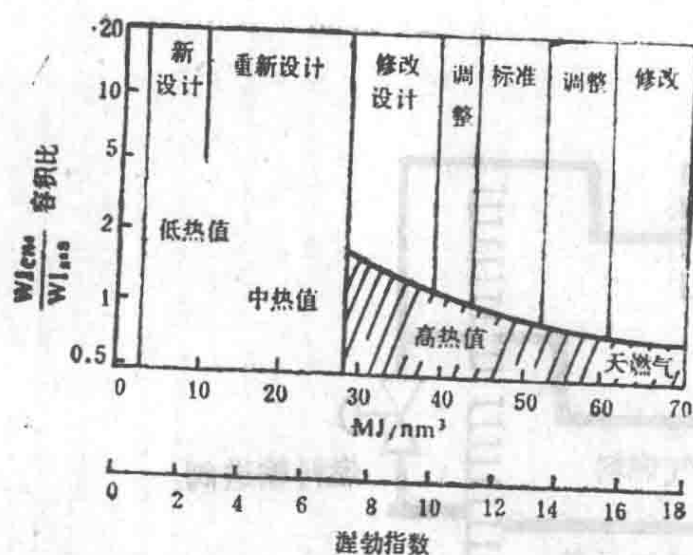


图3 由于燃料容积比随湿勃指数减少而增加所引起的燃料含有成分对尺寸再设计的影响

此，喷咀、火焰筒以及输送管线的尺寸都要相应地加大和改进。

1. 燃料气系统

国产轻型燃机（WP6、WP7、WP8等）均可改烧中、低热值气体。其中WP6、WP7等属于中小型燃气轮机系列，而WP8可视为大中型燃气轮机。其典型燃料气控制系统示于图4〔9〕。燃料气控制系统一定要包括所有必须的零部件，以便能在起动过程中和从慢车（或无负荷）状态至全负荷状态的运行当中，适当地供给燃料气，并要正确设计这种燃料气控制系统，使气体的湿勃指数（WI）变化在 $\pm 10\%$ 以内。

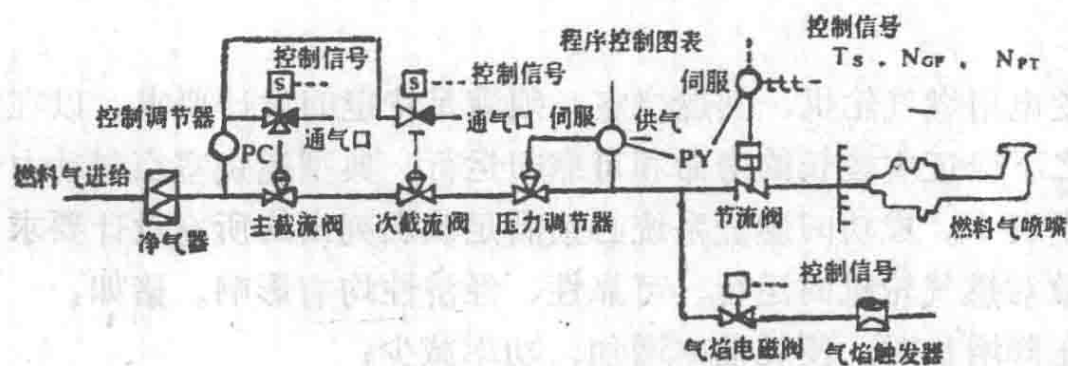


图4 典型燃料气控制系统〔9〕

为了保证起动可靠、迅速，双燃料系统（图5）提供较大的适应性。起动和停车采用天然气或馏份油燃料，即应为高热值燃料气，发电运行采用中、低热值燃料气。这种双燃料系统，热值变化范围可为 $11.8 \sim 35.44 \text{ MJ/nm}^3$ （标准天然气）。

当选择器阀在高热值位置时燃气轮机起动，燃料输送阀在关闭位置，这样加速到慢车。燃料选择阀转到中热值位置时，同时打开输送阀输送中热值燃料。这样能近似地保持燃料气喷咀的压降为常量。

当应用低热值燃料气时，湿勃指数WI相差很大，应采用分开式燃料气系统和完全分开的燃料喷咀的喷口。

2. 燃料气喷咀

W501燃气轮机的双燃料喷咀改烧低热值煤气后，几何尺寸相应地加大，但结构形式基本没有变化〔10〕。

文献〔9〕给出了烧中热值燃料气的燃料喷咀。改进后，采用了天然气单独供给的喷