

气体燃料组分变化对SG₂-6A燃气轮机燃烧室性能的影响

工程热物理研究所

吴文东、沙英普、孙秀婵、杨金生、张亚南

一、引言

在北京燕山石油化工总公司东方红炼油厂的燃气-蒸气联合循环装置中,用Spey MK-202燃气轮机的核心机作为燃气发生器、燃料使用炼油厂工艺过程中产生的干气。干气由H₂(氢)、N₂(氮)、C₁(甲烷)、C₂(乙烷、乙烯)、及少量的C₃(丙烷、丙烯)、C₄(丁烷、丁烯)组成,其热值为8000Kcal/kg左右。spey发动机使用液体燃料,为掌握使用气体燃料改型燃烧室的性能,需做单管燃烧室的性能试验。

由于很难把干气送到试验现场,试验中用液化石油气加H₂和N₂配制燃料气、保持其重量热值及含H₂量与干气相同,但代用气与干气相比,比重大,含N₂量多,C₁、C₂含量少,C₃、C₄含量多。可见二者的差别是很明显的,以代用气体燃料的试验结果,可用性如何?本文将进行讨论。

1. 燃料的互换性

对于工业燃烧炉,其燃料的互换性,美国在本世纪30—40年代,做了大量的工作,文献〔1〕是一篇总结性文章。作者Weaver提出,在不重新调整燃烧设备的前提下,用气体燃料“b”(代用燃料)代替“a”(原采用燃料)时,如果满足下列六个指数,则可以正常运行。

指数	最佳值	允许范围
$J_H = \frac{H_b}{H_a} \cdot \sqrt{\frac{d_a}{d_b}}$	1	$0.95 < J_H < 1.05$
$J_A = \frac{L_b}{L_a} \cdot \sqrt{\frac{d_a}{d_b}}$	1	$0.95 < J_A < 1.05$
$J_L = J_A \frac{U_b}{U_a} \frac{(1 - [O_2]_b)}{(1 - [O_2]_a)}$	1	$J_L < 0.64$
$J_F = U_b/U_a - 1.04J_A + 0.4$	0	$J_F < 0.08$
$J_Y = J_A + (N_b - N_a)/110 - 1$	0	$J_Y < 0.14$
$J_I = J_A - 0.366R_b/R_a - 0.634$	0	$J_I < 0$

式中H为单位摩尔燃料的高热值, L为单位摩尔燃料完全燃烧所需空气量, d为气体燃料的重度, N为单位摩尔燃料中炭原子数之和(烷烃除外), U为燃料混合气最大层流火焰传播速度, R为单位摩尔燃料中氢原子数与炭原子数之比, [O₂]为单位摩尔燃料中氧气的容积百

分比

这六个指数是根据工业燃烧炉的试验结果归纳出来的,对燃气轮机燃烧室不完全适用。 J_L , J_F , J_I 和 J_Y 是针对予混火焰的,而燃气轮机燃烧室中是扩散火焰。燃气轮机燃烧室出口温度场有较高的要求,这个要求不同于工业燃烧炉。对于温度场起决定性影响的是掺混孔。上述六个指数与掺混无关。

对于使用气体燃料的燃气轮机燃烧室,用指数 J_H 来判断燃料的互换性[2~4]。如果用气体燃料“b”代替“a”,除了单位时间的供热量要接近外,燃料供给系统对这两种燃料的节流特性也要相近,否则就要改变原供给系统,以适应代用燃料“b”。

我们将干气作为燃料“a”,液化石油气+氢+氮作为燃料“b”,对于八种代用燃料计算了 J_H 值(表一),它们都不满足 $\pm 5\%$ 的要求。因此,从试验到实际应用,燃料系统应作相应的修正。

表1 代用气体与干气成分对照表

气体成分 (%)	干 气	代 用 气 体								备 注
		1	2	3	4	5	6	7	8	
CH_4	21.44	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.16	0.34	0.14	
$C_2H_4 + C_2H_6$	13.97	0.12	6.25	0.21	0.12	0.09	0.03	0.03	0.37	
C_3H_8	1.95	6.92	1.16	8.27	7.00	7.44	2.95	3.39	9.72	
C_3H_6	2.24	22.92	3.27	27.34	23.21	30.61	62.59	56.26	28.99	
C_4H_{10}	0.00	14.31	6.08	1.62	13.88	15.26	9.64	10.05	19.51	异丁烷
C_4H_{10}	0.00	5.48	6.11	6.67	5.80	5.64	2.81	3.41	5.45	正丁烷
C_4H_8	0.00	36.32	66.36	41.11	36.22	28.94	16.62	19.33	20.32	正、异丁烯
C_4H_8	0.00	8.40	7.63	9.00	8.33	7.48	3.49	4.69	8.20	反丁烯
C_4H_8	0.00	5.01	2.96	5.28	4.98	4.33	1.54	2.39	4.69	顺丁烯
C_2H_{12}	0.00	4.48	0.09	0.05	0.43	0.21	0.16	0.11	2.31	
CO	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO ₂	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
H ₂	45.13	45.13	45.13	45.13	45.13	45.13	45.13	45.13	45.13	
N ₂	14.51	21.63	21.63	21.63	21.63	21.63	21.63	21.63	21.63	
O ₂	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
J_H		1.24	1.27	1.23	1.24	1.23	1.18	1.19	1.23	

注:代用气体均为液化石油气+H₂+N₂,其中从CH₄到CO₂各数据乘以0.3324为各成分的实际含量

我们发现 J_I 对判断燃烧效率有相当的参考意义。除 J_H 和 J_I 外,对于燃气轮机燃烧室气体燃料的互换性问题,没有现成的结果可用,只能通过实验来回答引言中提出的问题。

2. 试验方法简介

试验大部分是在常压下进行的。常压试验系统见图1。试验用的空气来自罗茨鼓风机,用两个闸阀控制流量。燃气水冷后经消音器排入大气。

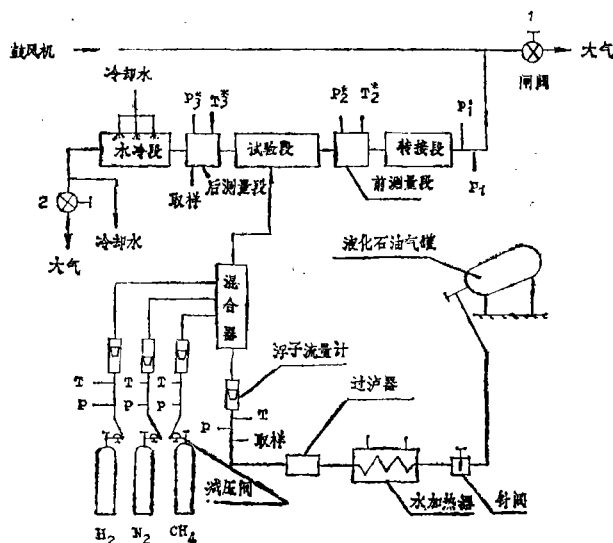
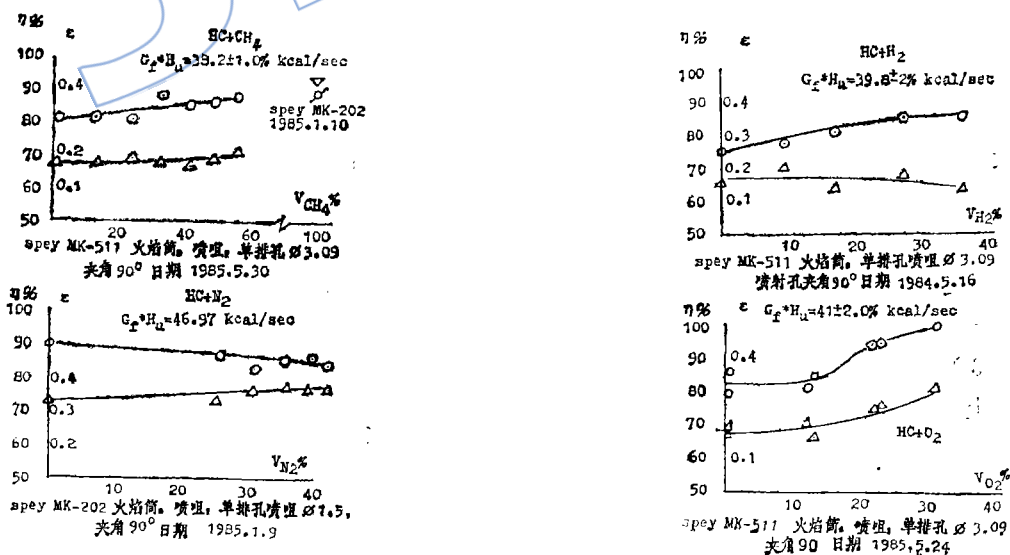


图1 常压试验系统示意图

燃料供给系统提供液化石油气(HC)、氢(H₂)和氮(N₂)、HC从倒置的液化石油气瓶中流出,经针阀控制流量、到汽化器内汽化、由玻璃转子流量计测量其流量后,与来自高压气瓶的H₂、N₂在混合器内混合。H₂和N₂由针阀控制,用玻璃转子流量计测量其流量。混合后的燃料经喷嘴进入燃烧室。

二、气体燃料的成分对燃烧效率(η)的影响

常压试验大部分在Spey MK-511火焰筒上进行的。部分在Spey MK-202火焰筒上进行的。图2为以HC为主,掺入不同量的H₂、CH₄、N₂、O₂的常压试验结果。图3为以HC为主,掺入不同量的N₂的高压试验结果($P_2^* = 5.3 \text{ kg/cm}^2$, $T_2^* = 212 \sim 219^\circ\text{C}$, $G_a = 1.45 \sim$

图2 燃烧效率 η 与燃烧室出口温度分布系数 ϵ 的关系

1.48kh/s)

据图 2、3 燃料成分增加对 η 和 ε (燃烧室出口温度分布系数) 的影响、归纳如下:

含量	H_2	N_2	CH_4	O_2
η	上升	略下降	上升	明显上升
ε	基本不变	略上升	基本不变	上升较多

下面为不同工况、不同燃料组成 MK-202 火焰筒部分高压试验结果。

G_2 (kg/s)	P_2 (kg/cm ²)	T_2^* (k)	$V_{HC}(\%)$	$V_{H_2}(\%)$	$V_{N_2}(\%)$	$\eta\%$	ε
1.47	5.28	491	18.8	26.2	55.0	99.5	0.28
1.86	7.07	544	37.8	22.2	40.0	98.5	0.29
1.87	7.05	494	31.7	16.6	50.2	102.7	0.32
2.11	8.03	560	34.5	22.4	43.1	98.5	0.28
2.29	8.34	554	25.0	18.9	56.1	101.5	0.32

表中 V_{HC} , V_{N_2} , V_{H_2} 为 HC , N_2 和 H_2 的容积百分比。由图 2 可见, 在在常温常压下, η 基本上为 0.9。由表可见, 在燃烧室进口气流的温度和压力升高以后, η 上升到 1.0 附近。

图 4 表示, 燃料由 C_{H_4} 、 H_2 , N_2 组成时, η 与 α 的关系。其 η 基本上在 100% 附近。

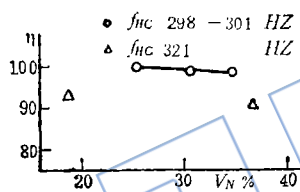


图 3 燃烧效率

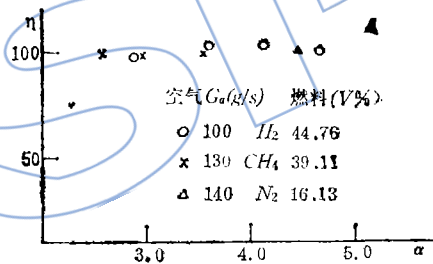


图 4 η 与 α 的关系

综合上述结果

(1) 在常温常压下, $C_{H_4} + H_2 + N_2$ 的燃烧性能明显优于 $H_C + H_2 + N_2$ 。这是由于在 H_C 中含大量非烷烃的 C_3 、 C_4 , 它们热分解严重, 在常温常压下, 燃烧不完全, 使 η 下降。

(2) 说明热分解的两个现象

a. 用 $H_C + N_2 + H_2$ 时, 火焰是黄色的。而用 $C_{H_4} + H_2 + N_2$ 时, 火焰是蓝色的。

b. 用 $H_C + H_2 + N_2$ 时, 工作不到一小时, 在喷咀表面就形成 0.5mm 厚的松散积碳。而用 $CH_4 + N_2 + H_2$ 时, 几个小时, 在喷咀表面也未见积碳。

(3) 对 $H_C + H_2 + N_2$, 来流温度和压力的提高, 弥补了热分解带来的不利影响。

综上所述, 常温常压条件下, 燃烧效率与燃料中的 H 原子数与 C 原子数之比有关。

Weaver 指数中的 J_I 即与此比值有关。下表列出 A、B、C 三种燃料相互代替时的 J_I 值。

基准气体 燃料	A	A	B	B
代用气体 燃料	B	C	A	C
J_I	-0.427	-0.778	0.3815	-0.296

其中: A为33.24% H_C + 45.13% H_2 + 21.63% N_2 ; B为干气; C为38.87% C_{H_4} + 45.13% H_2 + 16.1% N_2 。

干气和 H_C 成分如下: (容积百分比)

	C_{H_4}	$C_2H_4 + C_2H_6$	C_3H_8	C_3H_6	C_4H_{10}	C_4H_8	C_5H_{12}	H_2	N_2	O_2
干气	21.43	13.97	1.95	2.23	—	—	0.76	45.13	14.51	0.09
H_C	0.015	0.117	7	23.21	19.68	47.55	7.43	0	0	0

从前面引用的 J_I 公式来看, 当代用气燃料的 H/C 比 R_b 比基准燃料气的 R_a 大时, J_I 则小于零。在此情况下, 使用代用燃料时, 燃烧效率不会降低、换言之, R 值大者、燃烧效率高。因此, 当A, B, C三种燃料的化学当量绝热火焰温度差不多时, 燃料气C的燃烧效率就会高于燃料A的燃烧效率。所以, 可以认为, 在使用 $H_C + H_2 + N_2$ 时的燃烧效率如果能满足要求, 将来使用干气做为燃料时, 燃烧效率不会成问题。

三、燃料成分变化对出口温度分布的影响

燃气轮机燃烧室出口温度场, 大体可以用下述三个方面来考虑: (1)温度分布系数 $\varepsilon = (T_{3\max}^* - T_{3m}^*) / (T_{3m}^* - T_2^*)$ (2)最高温度点的位置, (3)温区的分布。

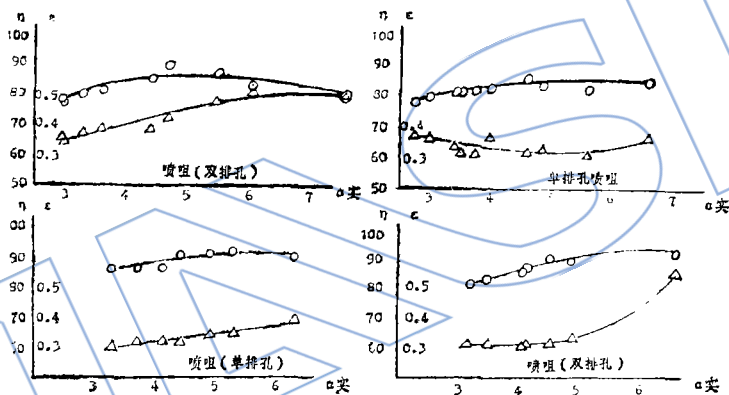


图5 用纯液化石油气在Spey MK-202中试验结果

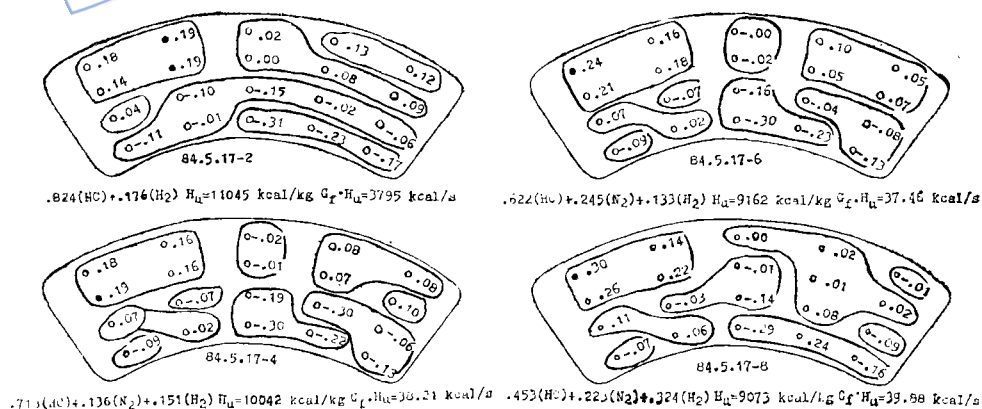


图6 燃烧室出口温度分布

由图 2、3、5 及表二可见, 对于 Spey MK-202 火焰筒, 无论燃料的组分如何变化, ε 基本在 0.3~0.35 之间。

由此可以认为, 在燃烧室结构不变的情况下, 燃料组分对 ε 的影响不大。

图 6 表示燃烧室温度分布情况

$$\theta = (T_{3,1}^* - T_{3,m}^*) / (T_{3,m}^* - T_2^*)$$

其中: $T_{3,1}^*$ 为当地总温度(出口截面), $T_{3,m}^*$ 为出截面平均总温, T_2^* 为进口截面总温。

把温度场分成以下几个区: 高温区 $-\theta_{\max}/2 \sim \theta_{\max}$, 次高温区 $-0 \sim \theta_{\max}/2$, 次低温区 $-\theta_{\min}/2 \sim 0$, 低温区 $-\theta_{\min} \sim \theta_{\min}/2$, 显然, $\theta_{\max} = \varepsilon$ 。

经这样处理后, 出口温度分布有如下特点: (1) 最高温和最低温点的位置不变, (2) 两侧温度高, 中间低; (3) 在同一次试验中, 尽管燃料组分变化较大, 但温度分布变化不大。

因此, 可以说, 燃料组分变化, 对燃烧室出口温度分布影响不大。

四、小 结

1. 在常温、常压条件下, $\text{HC} + \text{H}_2 + \text{N}_2$ 混合燃料及 HC 的燃烧效率低于 $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{N}_2$ 在同样条件下的燃烧效率。看来, 烧气体燃料时, 火焰筒头部比烧油时更接近均匀搅拌器, 燃料混合气的化学反应性能在整个燃烧过程中是十分重要的因素。

2. 混合燃料的 H/C 越高, 燃烧效率也最高。可见 J_1 指数对预测代用气体燃料的燃烧效率有一定的参考价值。

3. 在来流高压并加热的条件下, 燃料的热值相同组分变化时, 对 η 的影响不明显。

4. 燃料组分对 ε 的影响不大。

5. 可以认为, 用 $\text{HC} + \text{H}_2 + \text{N}_2$ 代替干气进行试验, 在保证二者热值和含 H_2 量不变的情况下, 只要前者的结果满足要求。则使用后者, 燃烧性能也能满足要求。

参 考 文 献

- [1] WeaVer, E. R. "Formulas and Graphs for Representing the Inter-Changeability of fuel gas", J. Res. Nat. Bur. Standards 46 (1951) S, 213/245.
- [2] Bittista, R. A., "Low Heating Value fuel burning Capacities of General Electrical industrial gas turbine", ASME Paper 82-GT-255.
- [3] Bailey, B. L., ASME Paper 83-GT-105.
- [4] Hung, W. S. Y., Meier, J. G., "Gaseous fuels Capability of Industrial Gas turbines", ASME Paper 85-IGT-129.

(责任编辑 王华芳)

optimization of the blade tip sweep should be determined from both aerodynamic and acoustic considerations, and the factors which should be taken into account in integrated or single optimization are indicated accordingly.

ELASTICITY MODEL FOR SCALING GAS TURBINE PERFORMANCE PREDICTION

Zhu Xingjian

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

W. F. O'Brien

(Virginia Polytechnic Institute and State University)

Abstract

Before a gas turbine is designed, many candidate designs with different values of design parameters must be studied. Calculation of design and off-design performances of proposed engines is needed, but actual component maps do not exist. In this paper, new scaling laws are developed and shown to produce component maps and estimates of new engine performances which are predicted to be close to the actual values. This "elasticity" model is based on the fundamental operating principles of the components.

EFFECTS OF ALTERNATIVE FUEL COMPONENTS ON PERFORMANCES OF A GAS TURBINE COMBUSTOR

Wu Wendong, Sha Yingpu, Sun Xiuchan, Yang Jingshang,
Zhang Yanan

(Institute of Engineering Thermophysics)

Abstract

The exchangeability of gaseous fuel for a gas turbine combustor was investigated experimentally and analysed in terms of indices J_H and J_I given in ref.(3).

Experimental results show that the effects of the alternative fuel components on the combustor exit temperature profile and distribution factor are not significant. It is also found that the ratio of H/C affects the combustion efficiency quite notably provided the inlet airflow is at normal pressure and temperature, but this effect weakens when the pressure and temperature of the inlet airflow rise.

A conclusion is made that the index J_I can be adopted to predict gaseous fuel combustion efficiency and thereby the exchangeability can be evaluated.

NONSYNCHRONOUS ORBITS IN A FLEXIBLE ROTOR-SQUEEZE FILM DAMPER SYSTEM

Zhu Changsheng and Feng Xinhai

(Gas Turbine Establishment)

Abstract

The possibility and the regularity of occurrence of nonsynchronous orbits are investigated based on experiments of a Jeffcott rotor-squeeze film damper(SFD) with/without a centralizing spring system. The influences of system parameters, such as radial clearance ratio,