

利用“蒸汽注入”技术提高国产燃机性能

航空航天部第 614 研究所
中国轻型燃气轮机开发中心

钱研生**
李怀悌

【摘要】 以 WZ-5 发动机燃气发生器作为试验机,进行了“蒸汽注入”试验。本文对试验机的选择、改装、试验参数的确定以及试验方案作了较详细叙述。试验结果表明:在注入蒸汽量 3.6t/h 的情况下, WZ-5 发动机功率可提高 40%,热效率可提高 25%,发动机出口温度场没有变坏。

关键词: 燃气发生器 蒸汽注入 试验

1 前 言

目前国产燃机性能都较差,1 方天然气只能发 2 度电,而现在已引进的国外机组 1 方天然气可发 3 度多电。由于国产燃机不能充分利用燃料资源,从而影响它们在国内各行业中广泛使用。通过提高循环参数改善燃机性能不仅投资巨大,且周期长;如何利用现有国产燃机,改善其循环特性提高性能是我国燃机工作者共同关心的问题。国际动力公司认为采用“蒸汽注入”技术是提高燃机性能的有效途径,它能大幅度提高燃机的功率和热效率,80 年代中,国外已有机组投入商业运行。为缩短这一领域差距,我们在 WZ-5 发动机燃气发生器上作了“蒸汽注入”试验并取得了一些有益的结果。目前国内能大量推广使用的燃机主要是 WJ5、WJ6 系列机组,对燃烧室来讲 WZ-5 与 WJ5 基本相同,与 WJ6 相似,用 WZ-5 发动机进行试验,其试验结果可直接用到这两个机组上。整机试验主要是研究循环参数与发动机性能的基本关系。燃气发生器的试验结果能够反映蒸汽注入发动机后对性能的影响,而且通过试验参数的整理可将结果分别用于分轴和定轴发动机上。由于采用燃气发生器进行试验,可以不带吸收功的负载装置,减少了试验设备和经费。WZ-5 燃气发生器试验装置是由 WZ-5 航空发动机改型设计而来,由附件机匣、带可调进气导叶的 10 级压气机、带 8 个头部的环形燃烧室、2 级涡轮、前后测量段、当量喷口、燃料系统、滑油系统及电液控制等系统组成。WZ-5 发动机主要性能参数(额定状态)为:功率 1300kW,压比 5.85,空气流量 12.15kg/s,转速 14600r/min,燃油耗量 560kg/h。

2 试验方案

2.1 蒸汽源

这次试验主要是探索 WZ-5 发动机燃气发生器注入蒸汽后性能参数及出口温度场的变化。从这个观点来看,蒸汽源是采用燃机通过余热锅炉自产的蒸汽或是外供蒸汽均可达到试验目的。为了减少其它因素可能带来的影响和节约试验经费,本试验使用现场已有的汽源外供蒸汽进行。燃机废热通过余热锅炉产生蒸汽是成熟的技术,可不必在这里一起进行试验验证。

2.2 注汽位置

选择注汽位置主要是保证蒸汽进入燃烧室后能与燃烧室内气流均匀掺混,使燃烧室出口温度场均匀。注汽位置大致可分燃烧室头部注汽(前排注汽),燃烧室掺混段注汽(后排注汽)。为了比较不同位置注汽对燃机的影响,这两种注入方式均进行了试验。根据 WZ-5 发动机燃烧室的具体情况,前排注入口安排在压气机出口扩散机匣整流支板前端的两侧。由于结构限制 16 个喷嘴孔径为 $\Phi 18$ 。注入蒸汽通过燃烧室内、外环腔进入火焰筒头部主燃孔及以后的掺混孔。前排注汽对减少 NO_x 生成有较大好处。WZ-5 发动机燃烧室火焰筒外环上有 24 个掺混孔,两个点火器占据了两个孔的位置,后排注汽是从正对 24 个孔中的 22 个孔注入。为了探索蒸汽注入速度对燃机性能的影响,后排注汽还作了两种不同孔径的喷嘴进行试验。

2.3 注汽量、注汽温度和压力

在一定蒸汽注入量的范围内,随着注汽量的增加,燃机功率和热效率提高的幅度也越大。根据 WZ-5、WJ-5 系列燃机排气流量和排气温度估算大约可产生蒸汽 4t/h 。因此确定本试验最大注入量为 3.6t/h 。由于注入蒸汽,涡轮流通能力相应需放大。在注入 3.6t/h 的情况下,1 级涡轮导向器需放大 8%,2 级导向器面积应放大 6%。这次试验用打磨尾缘的办法实现,注汽量如果再加大,导向器面积要放得更多,这将会对涡轮部件性能带来较大影响,给加工也带来更多的困难。此外注汽量的大小还受到强度、发动机喘振裕度的限制。为防止水滴进入燃机,注入蒸汽必需是过热蒸汽,过热度一般大于 $10\sim 20^\circ\text{C}$,本次试验采用外供蒸汽,来汽压力为 1.3MPa ,蒸汽温度为 250°C ,过热度约为 50°C ,符合试验要求。这一外供蒸汽的参数也与今后 WJ-5、WZ-5 燃机相配的余热锅炉参数一致,保持有足够的产汽量。

2.4 注汽系统设计

应考虑避免试验中有水滴进入燃机以及由于管路系统热膨胀和阀门后气流高速流动引起管路移动。除对蒸汽有一定过热度要求外,在注入蒸汽前,设法排除管路中可能存在的积水,要对整个系统加温,因此在各闸阀前装有排水阀,并通过蒸汽和燃机压气机后空气分别加温蒸汽截止阀前后的导管。为防止管路系统移动,将蒸汽总管支撑在发动机底座上;固定在地面的主蒸汽管与注汽环形总管之间以及环形总管与注汽喷嘴之间均采用金属软管。

3 试验情况

3.1 参数测量

为了测量发动机出口温度场,除原有 8 支单点监测电偶外还布置了 9 支 4 点电偶,一次能测出 36 个点,并可周向转动 4 个位置,因此可测出 144 个点分布的完整温度场。使用旋涡流量计计量燃料气量。另外还测量了燃料气压力、温度。在蒸汽管路上配有多个压力、温度测点。蒸汽流量自动记录仪自动显示流量、压力、温度以及蒸汽是否是过热蒸汽。

3.2 试验内容

为了摸清注入蒸汽对发动机的影响,进行了如下试验:(1) 不同注汽量 (1.8t/h , 2.7t/h , 3.6t/h) 对性能及温度场的影响。(2) 前排、后排以及前、后排各注 50% 三种注入方式对发动机性能及温度场的影响。(3) 试验了改变蒸汽喷嘴面积,从而改变注入速度对性能及温度场的影响。(4) 为了便于比较注汽效果,进行了几组不同喷口的试验。 $\Phi 240\text{mm}$ 喷口不注汽和注入 1.8t/h 、 2.7t/h 、 3.6t/h ; $\Phi 245\text{mm}$ 喷口不注汽和注入 1.8t/h 、 2.7t/h 、 3.6t/h ;

Φ250mm 喷口不注汽; Φ255mm 喷口不注汽。(5) 进行了注汽和不注汽排气成份的测量。试验累计进行了 29 小时 33 分, 93~98.5% 转速状态工作时间 21 小时 22 分, 注汽工作时间 13 小时 22 分。

4 试验结果

4. 1 注汽对燃机性能的影响

根据试验数据整理有如下结果: (1) 由于试验机是等转速调节, 注入蒸汽后燃机转速不变, 其它主要参数变化规律如图 1。(2) 前排注汽与后排注汽燃机性能变化差异不大。(3) 试验的两种后排注汽喷嘴(Φ18、Φ22)对燃机性能影响差异也不大。(4) 分轴燃气轮机和定轴燃气轮机在注入蒸汽后其工作点在压气机特性线图上的走向是不同的(见图 2), 因此注汽后性能变化比较方式也有所不同。

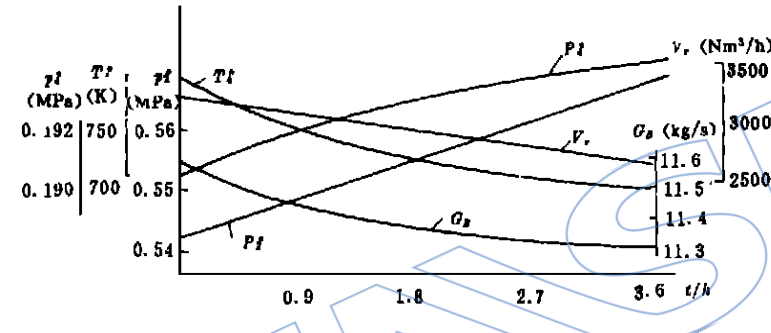


图 1 注汽后发动机参数变化

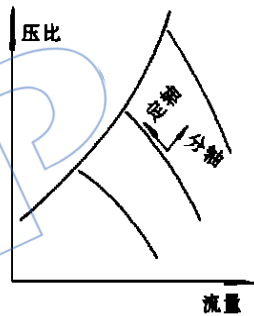


图 2 定轴、分轴发动机注汽后工作点变化

对于分轴燃机, 注入蒸汽后保持 T_3^* 不变的情况下燃机将在较高的转速下工作。如果保持注汽前、后 $T_3^* = 922\text{K}$, 不注汽时工作转速为 93%, 功率为 1090kW, 热效率为 17.6%。当注入蒸汽 2.7t/h 时, 燃机转速为 94.7% 功率增加到 1508kW, 热效率为 23.2%。功率相对增加量为 37.8%, 热效率相对增长量为 31.8%。注汽量对分轴燃机性能影响见表 1。

表 1 注汽量对分轴燃机性能影响 ($p_0 = 0.1013\text{MPa}$, $t_0 = 15^\circ\text{C}$, $T_3^* = 922\text{K}$, 喷口直径 Φ245)

注汽量 m_s (t/h)	转速 $\bar{n}_{zh}$ (%)	功率 N_{rzh} (kW)	热效率 η_{th} (%)	功率增长率 (%)	热效率增长率 (%)
0	93	1094	17.6		
1.8	93.7	1384	20.6	16.5	17.0
2.7	94.7	1508	23.2	37.8	31.8
3.6	(95)	(1532)	(24.05)	(40.0)	(36.6)

定轴燃机是沿等转速线工作, 用改变喷口面积的办法模拟注汽后保持 T_3^* 不变。在相同 $T_3^* = 919\text{K}$, $\bar{n}_{zh} = 93\%$ 的情况下, 不注汽时的功率为 1030kW, 热效率为 17.05%; 在注入蒸汽约 2.8t/h 时功率增加到 1505kW, 热效率增加到 21.95%, 功率相对增加 46.1%, 热效率相对增加 28.7%。性能对比见表 2。

表 2 注汽量对定轴燃机性能影响 ($p_0=0.1013\text{MPa}$, $t_0=15^\circ\text{C}$)

工 况	$\bar{n}_{zh}=91\% \quad T_3^*=907\text{K}$		$\bar{n}_{zh}=93\% \quad T_3^*=919\text{K}$	
注汽量 m_s (t/h)	0	2.0	0	2.8
当量喷口	$\Phi 255$	$\Phi 240$	$\Phi 255$	$\Phi 240$
功率 N_{rzh} (kW)	920	1264	1030	1505
热效率 η_{th} (%)	16.15	20.55	17.05	21.95
功率增长率 (%)		37.4		46.1
热效率增长率 (%)		27.2		28.7

4. 2 注汽后对涡轮出口温度场的影响

(1) 在试验的注汽流量范围内, 无论是前排或是后排注汽, 温度场品质均比原型机好, 且随着注汽量的增加越来越好 (见图 3)。

(2) 燃气出口温度场品质随转速变化的规律与不注蒸汽时相似。

(3) 在同一工况下, 同一注汽量相比, 前排注汽比后排注汽燃气温度场品质略好 (见表 3)。

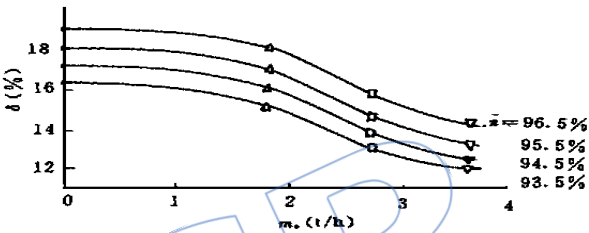


图 3 燃气出口温度场不均匀随注汽量的变化

表 3 注汽位置对涡轮出口温度场的影响

位置	前 排			后 排		
$\bar{n}_{zh}$ (%)	93.5	93.5	96.5	93.5	93.5	96.5
注汽量 (t/h)	1.8	2.7	3.6	1.8	2.7	3.6
δ (%)	15.3	13	14.5	18.7	16.7	16.8

5 结 论

(1) WZ-5 发动机注入蒸汽后, 功率和热效率有较大增长, 在相同的燃气初温下, 注入蒸汽 3.6t/h, 功率可提高 40%, 热效率可提高约 25%。(2) 进行前排、后排及前、后排各注 50% 三种情况下功率和热效率增加规律基本一致。(3) 注入蒸汽后, 温度场品质变好 (在试验的注汽流量范围内)。(4) 注入蒸汽后, 燃烧效率变化甚微。

参 考 文 献

1 Measserhil R L, Tischles A O. Dual-Fluid Cycle Gas Twrline to Incsease Power and Thermal Efficiency. 18th IECEC Meeting, 1983

2 Kolp D A, Moelles D J. Wosldi First Full Stig LM5000 Installed at Simpron Paper Company. ASME 88-GT-198

(责任编辑 魏星禄)

decision. The program is based on the Mean-Stream-Line Method. It is given in detail how to select the independent design functions of this method in programming. This program enables to be operated with a very small computer, even a pocket computer such as the Sharp PC-1500.

SPECIAL COLUMN: LIGHT-WEIGHT GAS TURBINE R & D OF LIGHT WEIGHT GAS TURBINE IN CHINA

Wang Zuhu and Li Huaiti

(China National Light-Weight Gas Turbine Development Centre)

ABSTRACT This paper introduces the engineering research of aeroderivative gas turbines in recent ten years in aspects of such as generator modified; power turbine research; alternative-fuel combustibility. The advanced and applied researches aim at meeting the demands for industrial and marine propulsion, such as prolonged life, improved performance, enhanced reliability and satisfactory variability.

ACOUSTICAL PROPERTIES OF SOUND ABSORBING STRUCTURES AT HIGH TEMPERATURE

Liu Wei, Tang Daomin

(Design Institute of Xian Aero-Engine Corporation)

ABSTRACT The acoustical properties of sound absorbing layers used in gas turbine exhaust silencing component at high temperature with temperature gradient were investigated by analysing the effect of temperature on the acoustical properties of porous materials. Some experimental results are given and a good agreement is found between theoretical prediction and measurements of acoustical properties at various temperatures up to 500°C.

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF GAS TURBINE WITH STEAM INJECTION

Qian Yansheng

(Wuxi Engine Research Institute)

Li Huaiti

(China Light Weight Gas Development Center)

ABSTRACT This paper describes how to choose and modify the WZ-5 gas turbine for steam injection testing and how to evaluate testing parameters and programmes. Testing results indicate that when the steam is injected 3.6t/h into the WZ-5 gas turbine, its power output and thermal efficiency increase 40% and 25% respectively. Moreover, the steam injection does not deteriorate the exit temperature profile in the turbine, which ensures a long term reliability of operation for the engine.