

辅助动力装置全环形燃烧室燃烧性能试验研究

陈利强¹ 颜应文² 徐 榕² 孔祖开¹

(1. 中航工业金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106; 2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 针对某型辅助动力装置全环形燃烧室开展了整机燃烧性能试验研究。采用温度靶测量全环形燃烧室出口温度分布, 研究不同进口温度和油气比条件下辅助动力装置燃烧室整机燃烧性能。试验结果表明: 随着进口温度和油气比的增加, 燃烧室出口温度相应增加, 但温度分布规律基本保持不变, 出口温度分布系数(OTDF) 小于 0.2, 径向温度分布系数(RTDF) 基本小于 0.1, 而燃烧效率和燃烧室进出口压力损失系数增加; 随着进口总温的增加, 燃烧室贫油熄火油气比逐渐减少(余气系数增加), 但燃烧室的贫油熄火余气系数均大于 13。

关 键 词: 辅助动力装置; 全环形燃烧室; 燃烧性能; 温度分布

中图分类号: V231.2 文献标识码: A

引 言

辅助动力装置(APU) 是一种小型涡轮发动机, 具有体积小、重量轻、寿命长、自身起动时间短、能够同时输出轴功率和压缩空气、可以独立工作等特点, 在大型军民飞机上得到广泛应用, 具有改善发动机起动性能, 提高飞机自给能力, 降低使用费用, 提高飞行安全性等诸多优点, 对提高大型军民飞机的综合效能有重要意义, 被称为飞机的第二动力。

由于燃烧室出口温度分布是否合理, 直接影响涡轮部件寿命以及发动机工作可靠性, 是燃烧室的重要性能指标之一。因此, 对燃烧室进行设计与研制时, 除了研究新型的耐高温材料和加强冷却外, 改善燃烧室出口温度场品质, 降低温度场中的热点温度也非常重要。文献[1] 试验研究层板与冲击气膜两种冷却方式对回流燃烧室出口温度分布的影响; 文献[2] 在试验研究不同燃料对燃烧室出口温度分布及燃烧性能基础上, 提出估算燃烧室出口温度分布系数与污染物浓度的经验关系式; 文献[3] 在三

头部燃烧室矩形试验件上试验研究燃烧室火焰筒头部各部件的几何特性以及喷嘴形式等对燃烧室出口温度场及出口温度分布的影响, 结果表明结构合理的一级和二级旋流器与套筒组合恰当, 可得到较好的燃烧室出口温度分布; 文献[4] 探索了不同的燃烧室进口空气温度、燃烧室的温升、燃油喷嘴的类型、旋流器以及掺混孔对燃烧室出口温度场的影响; 文献[5~7] 分别对燃烧室出口温度分布进行了测量或预测, 其中文献[7] 根据实测 4 种不同的环形燃烧室出口的热点和冷点温度, 分析燃烧室余气系数、进口温度、喷嘴类型与数目、旋流器和火焰筒等对燃烧室出口热点(最高温度点) 和冷点(最低温度点) 温度的影响; 文献[8] 在全环形回流燃烧室中, 探索了燃油喷嘴和旋流器组件的轴向位置变化对燃烧室出口温度场的影响, 提出一种燃烧室出口温度场调试方法。

本研究针对某型辅助动力装置全环形燃烧室整机试验的特点, 在原有 APU 整机基础上设计相关试验系统, 开展了在不同油气比和进口温度等进口参数下燃烧室出口温度分布、燃烧效率、总压损失以及贫油熄火特性等燃烧性能参数的研究。

1 研究对象

研究对象为某型 APU 整机全环形回流型燃烧室, 其结构如图 1 所示。全环形燃烧室主要由机匣、6 个火焰筒头部组件、火焰筒内外环组件和喷嘴等组成。该研究对象的两个主要特点是: (1) 该全环形燃烧室火焰筒特点是在火焰筒头部沿径向安排了 36 道舌片, 用来改变这些孔在火焰筒头部的气流结构, 一方面在主燃区形成相对稳定的涡流来稳定燃烧火焰, 另一方面为主燃区提供适量的空气参与组

收稿日期: 2012-04-06; 修订日期: 2012-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906040); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(NZ2012107)

作者简介: 陈利强(1980-), 男, 河南许昌人, 中航工业金城南京机电液压工程研究中心工程师。

织燃烧;(2) 该研究对象采用的是实际真实 APU 整机,只是用专门加工的固定无叶片的压气机进气导向器和涡轮导向器替换了原 APU 整机上的带转动部件的离心式压气机、向心涡轮以及中心转动轴,但保留基本流道形状与原样机相同,因此该试验与单头部或多头部燃烧室试验相比,进气和排气情况更真实地模拟了 APU 整机实际工作时进气和排气情况,而 APU 进口压缩空气由专门的压气机组提供。

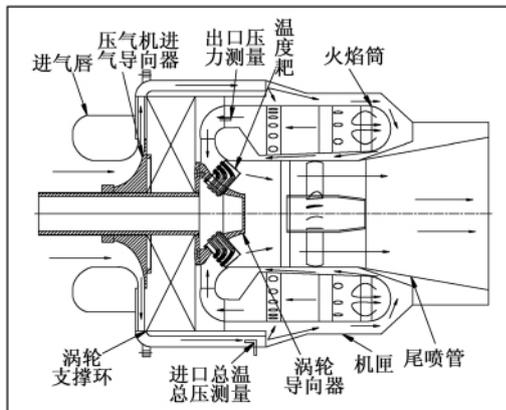


图 1 APU 全环形燃烧室结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of an APU (auxiliary power unit) whole annular combustor

2 试验系统和试验工况

2.1 试验系统设计

试验系统如图 2 所示,包括压气机机组、进气管路系统、空气电加热系统、进口转接段、进口测量段、APU 全环形燃烧室、出口测量段、出口转接段、排气系统、燃油控制系统、点火系统、空气冷却系统、温度数据实时采集与处理系统等组成。气源由压气机提供,气流经稳压罐后流入一台 200 kW 的电加热器内进行电加热,以确保在进行燃烧室试验时提供不同温度的进口气流。气流在流经压气机进气导向器后,即将进入全环形燃烧室前,测量其进口总温 T_3 和进口总压 P_3 ,然后进入全环形燃烧室,并与从喷嘴喷出的燃油混合燃烧,燃烧后的高温尾气在燃烧室出口测量燃烧室出口总压,高温尾气流过燃烧室后进入涡轮导向器,利用圆周方向布置的 6 支 3 点温度靶测量燃烧室出口高温尾气的总温,由于流出燃烧室出口到涡轮导向器之间向外传递热量非常小,同时也没有外界冷空气流入,因此可以认为在温度靶处测量得到的温度分布即为燃烧室出口温度分

布,其温度信号通过 I-7018 热电偶模块与温度靶连接,计算机进行数据实时采集,压力通过压力表进行测量。最后,高温尾气进入排气罐经过冷却、净化处理后排出。

试验采用径向 3 点温度靶测量 APU 全环形燃烧室出口截面上燃气径向温度分布,热电偶选用 K 型热电偶(精度 II 级),温度靶在径向的 3 个测点在测量通道内的相对位置如图 3 所示。

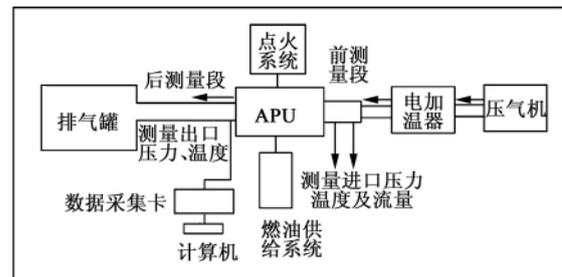


图 2 APU 燃烧室试验系统
Fig. 2 APU combustor test system

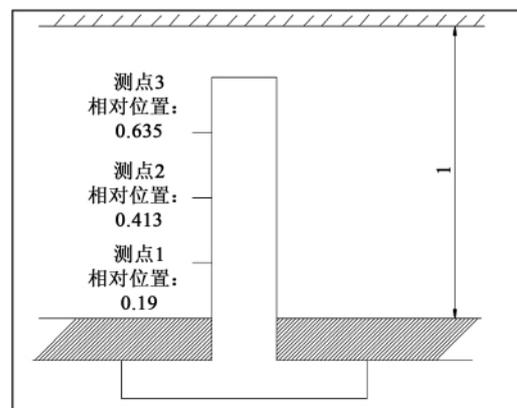


图 3 温度靶测点布置相对位置
Fig. 3 Temperature target measurement point arrangement relative locations

由于 APU 全环形燃烧室出口物理空间的限制,本试验在全环形燃烧室出口圆周方向同时布置 6 个温度靶,用来测量周向温度分布,为了增加测量精度,在同一工况条件下测量圆周方向燃气温度后,把温度靶旋转一个特定角度,并把其中一个温度靶换为总压靶,对该工况进行测量,因此在圆周方向总共可测量 11 个测温点。

2.2 试验工况

本试验主要研究不同油气比和进气温度对燃烧室出口温度分布、燃烧效率、总压损失和贫油熄火油

表 1 试验工况

Tab. 1 Test operating conditions

工况	进气流量 / kg · s ⁻¹	进气温度 / K	油气比 <i>f</i>
1	0.38	380	0.0095
2	0.38	380	0.0133
3	0.38	380	0.0176
4	0.38	480	0.0095
5	0.38	480	0.0133
6	0.38	480	0.0176

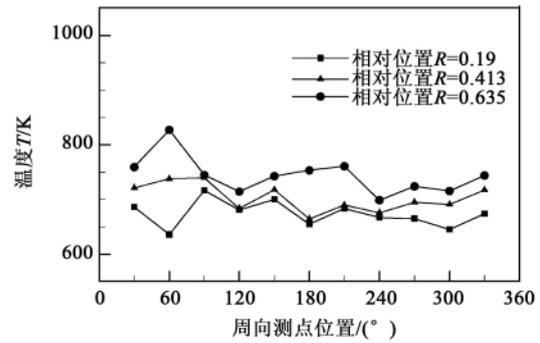


图 4 工况 1 周向温度分布

Fig. 4 Temperature distribution along the circumferential direction(operating condition No. 1)

3 试验结果分析

3.1 周向温度分布

图 4 ~ 图 6 为进口温度 380 K 和进口流量 0.38 kg/s 情况下, 油气比 *f* 分别为 0.0095、0.0133、0.0176 时燃烧室出口周向温度分布。从图中可看出, 在火焰筒壁面附近, 靠近叶根处, 燃气温度较低, 随着叶片高度逐渐增加, 燃气温度也相应增高, 符合对燃烧室出口温度分布要求。另外, 在圆周方向, 燃气温度呈波浪形分布, 原因: (1) 燃油喷嘴喷雾锥角的影响, 使喷雾锥中心截面上燃油浓度较高, 而在两个喷嘴之间截面上燃油浓度较低, 因此 6 个喷嘴喷雾锥角作用下使火焰筒头部燃油浓度周向分布不均匀, 不同燃油浓度的混气, 燃烧放出热量不同, 所得的燃气温度在周向也有高低不同的差别; (2) 掺混孔的影响, 在掺混孔截面因从掺混孔进入冷射流与高温燃气混合, 使该截面附近的燃气温度降低, 而没有掺混孔截面的燃气温度仍较高。因此在内外环各个掺混孔射流作用下使燃气温度在周向也有所不同, 以上两个因素综合作用, 使燃气温度呈波浪形分布。

比较图 4 ~ 图 6 可知, 在进口空气流量和温度相同条件下, 随着油气比增加, 燃油流量加大, 燃烧放出热量也相应增大, 燃烧室出口温度也逐渐升高, 但油气比改变对出口径向温度和周向温度分布趋势影响不大, 径向温度和周向温度分布曲线形状基本相似。

图 7 ~ 图 9 为进口温度 480 K 和空气流量 0.38 kg/s 情况下, 油气比分别为 0.0095、0.0133 和 0.0176 时燃烧室出口周向温度分布, 与图 4 ~ 图 6 相似, 随着油气比逐渐增加, 燃烧室出口周向温度逐渐增加, 而周向温度分布趋势基本保持不变。

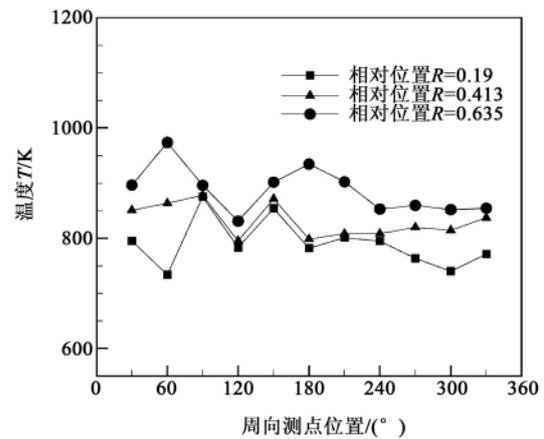


图 5 工况 2 周向温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along the circumferential direction(operating condition No. 2)

当分别比较图 4 和图 7、图 5 和图 8 以及图 6 和图 9, 可以看出, 当油气比保持不变, 而改变进口总温时, 出口周向温度分布也相应增加, 由于油气比不变, 放热量基本保持不变, 因此温升保持基本不变, 所以进口总温提高 100 K, 出口相应测量总温也大致提高 100 K, 但周向温度分布趋势也基本保持不变。

从上述分析可以看出, 随着进口温度或油气比增加, 燃烧室出口温度都相应增加; 但进口气流参数变化对燃烧室出口径向温度和周向分布影响不大。这可能因燃烧室出口温度分布趋势主要与火焰筒的开孔规律以及燃油喷嘴喷雾角与燃油浓度分布有关, 因此燃烧室一定时, 进口工况改变对燃烧室出口温度数值大小有影响, 但所得的分布趋势基本相似。

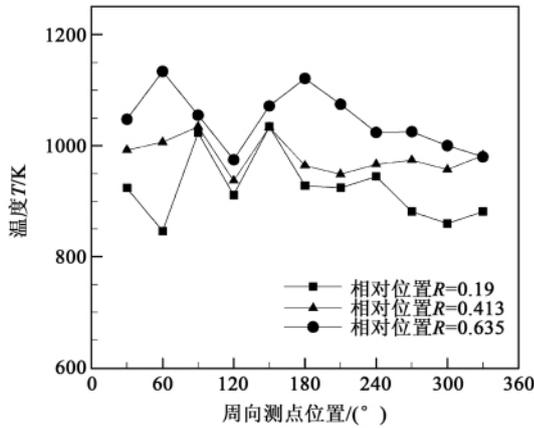


图 6 工况 3 周向温度分布

Fig. 6 Temperature distribution along the circumferential direction(operating condition No. 3)

一致。

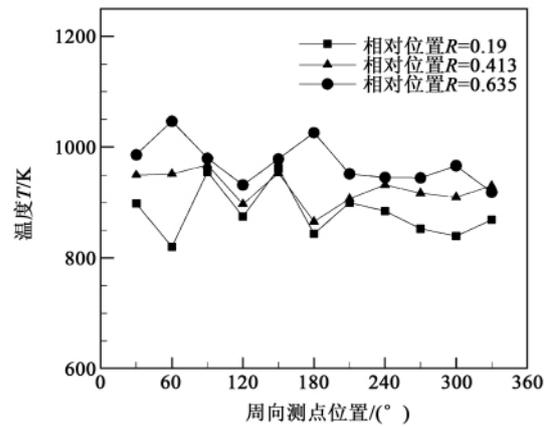


图 8 工况 5 周向温度分布

Fig. 8 Temperature distribution along the circumferential direction(operating condition No. 5)

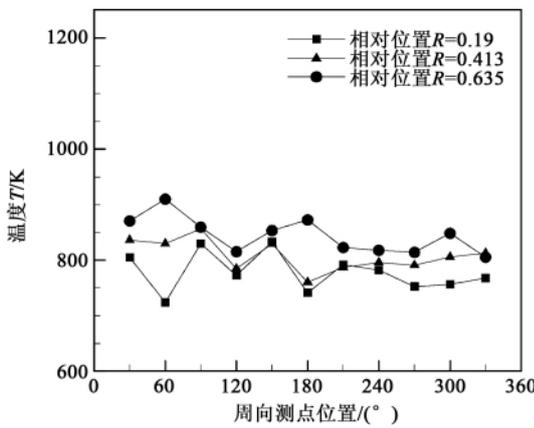


图 7 工况 4 周向温度分布

Fig. 7 Temperature distribution along the circumferential direction(operating condition No. 4)

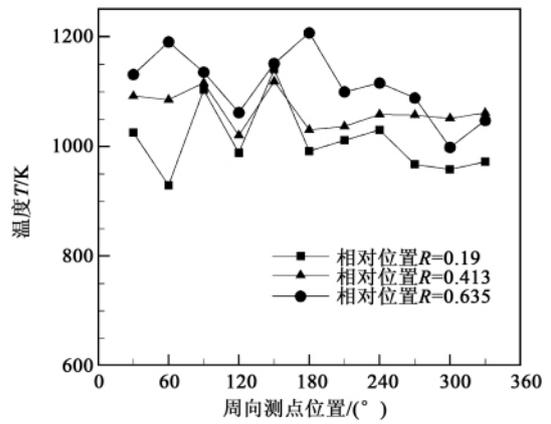


图 9 工况 6 周向温度分布

Fig. 9 Temperature distribution along the circumferential direction(operating condition No. 6)

3.2 径向温度分布

图 10 为不同进口工况对 APU 全环形燃烧室火焰筒出口径向温度分布的影响。图中纵坐标 y/y_0 相对值表示燃烧室出口各测量点的径向位置,其中 y_0 为出口截面最大径向高度 y 为各测量点径向高度 横坐标表示出口截面上燃气温度。由图可知 径向温度分布在叶根部分温度最低,随着径向高度逐渐增加,燃气温度也逐渐增加。当温度保持不变,随着油气比的增加,因加入燃油量增加,混气燃烧放出的热量相应增多,燃烧室出口温度升高,但是各个油气比下的径向温度变化规律是基本一致的。当油气比不变时,随着燃烧室进口温度增加,燃烧室出口径向温度分布基本相当于在低温时的温度径向分布向右平移相应的温差,因此径向温度变化规律也基本

3.3 燃烧性能

为了定量评价不同进口温度和油气比对 APU 全环形燃烧室火焰筒燃烧性能的影响,表 2 列出了 6 种工况下火焰筒的燃烧效率、出口 OTDF(出口温度分布系数)和 RTDF(径向温度分布系数)。

从表中比较不同工况下火焰筒燃烧效率,采用温升法计算燃烧效率,在同一油气比条件下,增加进口总温,有利于燃油喷出雾化后的油滴的蒸发,对相同直径的油滴,空气温度越高,油滴蒸发越快,燃油蒸汽与空气的掺混也越好,燃烧效率提高,因此提高进口总温,燃烧效率提高;在同一温度下,随着油气比的增加,燃烧效率也相应增加,这是由于当油气比为燃烧室设计最佳值时,燃烧效率达最高,因此在贫

油状况下,随着油气比增加,逐渐接近最佳油气比时,燃油雾化得到改善,燃烧较为完全,燃烧放出热量更多,燃气温度升高,燃烧效率也相应增加。

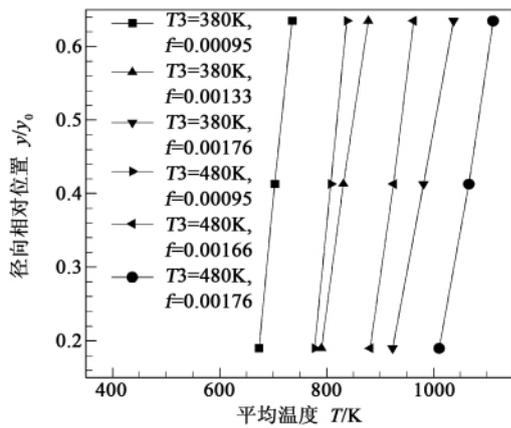


图 10 出口径向温度分布比较图

Fig. 10 Chart showing a comparison of the temperature distribution along the radial direction at the outlet

表 2 燃烧性能的比较

Tab. 2 Comparison of the combustion performance

工况	燃烧效率/%	OTDF	RTDF
1	84.5	0.166	0.094
2	89.0	0.190	0.096
3	91.0	0.198	0.088
4	89.0	0.182	0.130
5	89.4	0.196	0.098
6	91.0	0.200	0.071

从表中比较不同工况条件下火焰筒出口 OTDF,在同一油气比条件下,增加进口总温,出口 OTDF 有所增大;在同一温度下,随着油气比的增加,出口 OTDF 也相应增加。无论是进口温度的变化还是油气比的变化,出口 OTDF 均满足 $OTDF \leq 0.2$ 。

从表中比较不同工况条件下火焰筒出口 RTDF。从表中可以看出,在同一温度下,随着油气比的增加,出口 RTDF 相应减少。无论是进口温度的变化还是油气比的变化,出口 RTDF 基本满足 $RTDF \leq 0.1$ 。

3.4 总压损失

图 11 为不同进口参数条件下火焰筒总压损失系数的大小。

从图中可以看出,在同一进口温度条件下,随着油气比的增加,即燃烧室温升的增加,热阻损失增加,因此燃烧室进出口总压损失增大,火焰筒总压损

失系数相应增加;在同一油气比条件下,进口总温增加,燃气密度减少,空气流量恒定条件下,气流速度增加,因此流阻损失增加,相应的火焰筒总压损失系数增大。因此,进口温度增加和油气比增加均导致火焰筒总压损失增大。

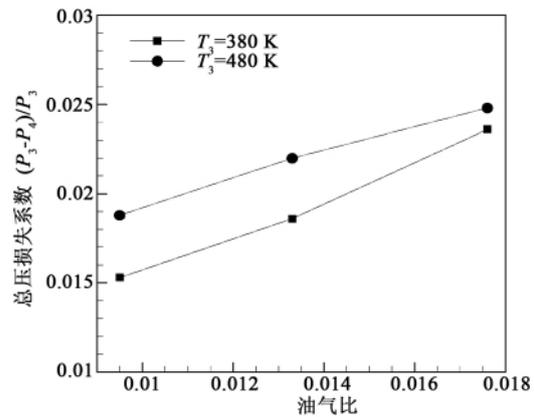


图 11 总压损失系数比较

Fig. 11 Chart showing a comparison of the total pressure loss coefficients

3.5 贫油熄火极限

表 3 为 APU 全环形燃烧室贫油熄火性能试验数据。从表中可以看出,随着进口总温的增加,燃烧室贫油熄火油气比减少(余气系数增加),这是由于随着进口总温增加,有利于燃油雾化和蒸发,燃烧更完全,燃烧稳定性得到改善,因此贫油熄火油气比相应减少。

表 3 贫油熄火性能的比较

Tab. 3 Comparison of the flame extinguishment performance of lean oils

进口温度 T_3 /K	油气比 f	余气系数 α
380	0.004848	13.87
480	0.003997	16.83

4 结 论

针对某型辅助动力装置全环形燃烧室进行整机燃烧性能试验,分别测量了 APU 全环形燃烧室的燃烧效率、总压恢复系数、出口温度分布系数、贫油熄火极限等性能参数,主要得到以下基本结论:

(1) 随着进口温度和油气比的增加,燃烧室出口温度相应增加,但周向温度分布和径向温度分布规律基本保持不变;

(2) 出口温度分布系数 OTDF 均满足 ≤ 0.2 , RTDF 基本上满足 ≤ 0.1 ;

(3) 采用温升法 ,计算 APU 燃烧室的燃烧效率 随着进口温度和油气比的增加 ,燃烧效率增加 ,在不同工况条件下 ,燃烧效率在 0.9 左右;

(4) 随着进口温度和油气比的增加 ,火焰筒总压损失系数增加;

(5) 随着进口温度的增加 ,燃烧室贫油熄火油气比减少(余气系数增加) ,贫油熄火余气系数远远大于 13。

参考文献:

[1] Norgren C T ,Riddlebaugh S M. Small gas turbine combustor study-combustor liner evaluation[R]. AIAA 83 -0377 ,1983.

[2] Lefebvre A H. Fuel effects on gas turbine combustion liner temperature ,pattern factor and pollutant emissions[J]. Aircraft ,1984 ,21 (11) : 887 - 898.

[3] 李尚维. 燃烧室头部部件几何特性对温度场的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究 ,1996 9(4) : 187 - 190.

LI Shang-wei. Effect of the geometrical characteristics of the component of the combustor head on its temperature field [J]. Gas Turbine Experiment and Research ,1996 9(4) : 187 - 190.

[4] 彭拾义. 燃烧室出口温度分布的研究[J]. 燃气轮机技术 , 1994 7(3) : 39 - 45.

PENG Shi-yi. Study of the temperature distribution at the outlet of a combustor [J]. Gas Turbine Technology ,1994 7(3) : 39 - 45.

[5] 彭 建 ,白庆雪. 航空发动机燃烧室温度测量[J]. 燃气涡轮试验与研究 ,2000 ,13(2) : 50 - 52.

PENG Jian ,BAI Qing-xue. Temperature measurement of the combustor of an aero-engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research ,2000 ,13(2) : 50 - 52.

[6] 李继保 ,金如山. 燃烧室出口径向温度分布试验及分析模型[J]. 航空动力学报 ,1989 4(1) 37 - 40.

LI Ji-bao ,JIN Ru-shan. Test and model for analyzing the radial temperature distribution at the outlet of a combustor [J]. Journal of Aerospace Power ,1989 4(1) 37 - 40.

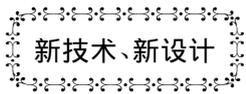
[7] 彭拾义. 环形燃烧室出口热点和冷点的研究[J]. 燃气轮机技术 ,1991 4(1) : 30 - 36.

PENG Shi-yi. Study of the hot and cold points at the outlet of an annular combustor [J]. Gas Turbine Technology ,1991 4(1) : 30 - 36.

[8] 胡好生 赵坚行 钟建平 等. 一种新颖的燃烧室出口温度场调试方法[J]. 航空动力学报 ,2007 22(8) : 1222 - 1226.

HU Hao-sheng ,ZHAO Jian-xing ,ZHONG Jian-ping ,et al. A novel method for commissioning the temperature field at the outlet of a combustor [J]. Journal of Aerospace Power ,2007 ,22(8) : 1222 - 1226.

(丛 敏 编辑)



SGT5 - 8000H 电厂的 4 亿美元总承包订单

据《Gas Turbine World》2012 年 5 - 6 月刊报道 ,Siemens 公司已签订总承包合同 ,为韩国供应并安装 50 Hz SGT5 - 8000H 动力装置。

以天然气为燃料 ,在 ISO 条件下 SGT5 - 8000H 简单循环装置的额定输出功率为 375 MW ,热耗率为 8 999 kJ/(kWh) (效率 40.0%) 。

以 1 台燃气轮机加 1 台汽轮机单轴配置的联合循环装置的额定净输出功率为 570 MW ,热耗率为 6 005 kJ/(kWh) (效率 60.0%) 。

Siemens 公司新 H 级燃气轮机在韩国规划项目正在 GS Electric Power and Services Ltd 现场建造中 ,并且将用 LNG(液化天然气) 作为燃料。

总价格约为 4 亿美元 ,总承包合同在 2011 年年初签订并将预期在 2013 年年初开始商业运行。

(吉桂明 摘译)

聚焦式太阳能热发电中的蓄热技术及系统 = **Heat Accumulation Technologies and Systems for Use in Concentration Type Solar Energy Thermal Power Generation** [刊, 汉] YIN Hui-bin, YANG Xiao-xi (Guangdong Provincial Key Laboratory on Distributed Energy Source System, Dongguan College of Science and Technology, Dongguan, China, Post Code: 523808), DING Jing (Engineering College, Zhongshan University, Guangzhou, China, Post Code: 510006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(1). - 1 ~ 6

In combination with the practical applications of the concentration type solar energy in thermal power generation projects, the authors systematically described the key unit technology adopted—high temperature heat accumulation technologies and their systems, of which the main development thought is to develop a heat accumulation medium material with a high heat accumulation density, high operation temperature, high heat accumulation/release rate, low cost and environment friendship, develop a process controllable heat accumulation mode and study the mechanism governing the transmission of and heat accumulation in a working medium at a high efficiency. From such viewpoints as the heat accumulation medium, mode and device etc, the authors have introduced the heat accumulation technologies and systems used for the concentration type solar energy power generation and also pointed out that the melted salt high temperature heat accumulation will be the focal point for future development in solar energy high temperature heat utilization. **Key words:** concentration type solar energy thermal power generation, heat accumulation, system

辅助动力装置全环形燃烧室燃烧性能试验研究 = **Experimental Study of the Combustion Performance of a Wholly Annular Combustor of an Auxiliary Power Plant** [刊, 汉] CHEN Li-qiang, KONG Zu-kai (Jincheng Nanjing Research Center for Electromechanical and Hydraulic Engineering, Nanjing, China, Post Code: 211106), YAN Ying-wen, XU Rong (College of Energy Source and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(1). - 7 ~ 12

Experimentally studied was the whole-machine combustion performance of a wholly annular combustor of an auxiliary power plant. A temperature rake was used to measure the temperature distribution at the outlet of the combustor and investigate the whole-machine combustion performance of the combustor under discussion at various inlet temperatures and oil/gas ratios. The test results show that with an increase of the inlet temperature and oil/gas ratio, the temperature at the outlet of the combustor will increase accordingly, however, the temperature distribution law will basically keep unchanged. The outlet temperature distribution factor (OTDF) will be less than 0.2 and the radial temperature distribution factor (RTDF) will be basically less than 0.1 while the combustion efficiency and the pressure loss coefficient at both inlet and outlet of the combustor will increase. With an increase of the total temperature at the inlet, the oil/gas ratio, at which a flame extinguishment will occur to the combustor due to a lack of oil, will decrease gradually (air excess coefficient will increase), however, all the air excess coefficients will be more than 13 when a flame extinguishment occurs to the combustor due to a lack of oil. **Key words:** auxiliary power plant, wholly annular combustor, combustion performance, temperature distribution