

# SGT5-4000F 燃气轮机改进升级措施分析

史玉恒<sup>1,2</sup>, 刘润泽<sup>1,3</sup>, 李士龙<sup>1</sup>, 蒋东翔<sup>2</sup>

(1. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 北京市 朝阳区 100015; 2. 清华大学能源与动力工程系, 北京市 海淀区 100084; 3. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 闵行区 200240)

## SGT5-4000F Gas Turbine Improvement and Upgrade Measures Analysis

SHI Yuheng<sup>1,2</sup>, LIU Runze<sup>1,3</sup>, LI Shilong<sup>1</sup>, JIANG Dongxiang<sup>2</sup>

(1. China United Gas Turbine Technology Co., Ltd., Chaoyang District, Beijing 100015, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

**摘要:**【目的】为了给我国自主重型燃机研发及后续改进升级提供技术参考和设计依据, 分析了SGT5-4000F燃气轮机改进升级措施。【方法】通过对SGT5-4000F燃机相关文献和资料的收集整理、性能分析, 总结出了该燃机自1996年引入市场以来, 西门子为提高该燃机性能采取的一系列改进升级措施。【结果】通过提升压气机进气量、降低冷却空气量、采用液压间隙优化 (hydraulic clearance optimization, HCO) 等技术提升燃机功率和热效率; 通过采用预混值班级、优化燃烧器主旋流器叶型等措施提高燃烧室热声稳定性、降低NO<sub>x</sub>排放; 通过采用经过验证的新材料、新铸造技术等提高部件的耐用性、使用寿命和燃机运行灵活性。【结论】上述改进升级措施可作为我国自主重型燃机及其衍生型号未来进行改进升级的技术参考和设计依据。

**关键词:** 重型燃气轮机; SGT5-4000F; 改进; 升级; 技术验证

**ABSTRACT:** [Objectives] In order to provide technical reference and design basis for the research and subsequent upgrade of China's independent heavy-duty gas turbine, a series of upgrade measures of SGT5-4000F gas turbine were analyzed. [Methods] Through the collection, organization and performance analysis of relevant literature and data on the SGT5-4000F gas turbine, a series of upgrade measures taken by Siemens to improve the performance of the gas turbine have been summarized since it was introduced to the market in 1996. [Results] Through the analysis, it can be concluded that Siemens' upgrade measures include: increasing

compressor mass flow, reducing the cooling air and adopting HCO to improve the power and thermal efficiency. The use of premixed pilot and optimization of the main swirler helps to improve the thermo-acoustic stability and reduce NO<sub>x</sub> emission. The validated new materials and new casting technologies can be used to improve the durability, life and operational flexibility. [Conclusions] The above technical upgrade measures can be used as technical reference and design basis for future improvement and upgrade of China's independent heavy-duty gas turbine and its derivative models.

**KEY WORDS:** heavy-duty gas turbine; SGT5-4000F; improvement; upgrade; technical validation

## 0 引言

从20世纪80年代末到90年代初, 西门子公司开始研制Vx4.3A系列燃机, 该燃机由西门子与普惠公司联合设计。Vx4.3A燃机设计基于普惠先进航空发动机的气动、冷却、单晶叶片、热障涂层和材料等技术, 同时结合了西门子在V94.2和V64.3等地面燃机Hirth端面齿、中心拉杆转子结构设计经验和运行经验<sup>[1]</sup>。

SGT5-4000F(即V94.3A)燃气轮机是在V84.3A燃机的基础上模化放大1.2倍得到<sup>[2]</sup>, 于1996年投入市场。该燃机为单轴发电用F级重型燃机, 发电频率50 Hz, 主要用于燃气-蒸汽联合循环电站, 基本结构形式为15级轴流压气机、环形燃烧室、4级空气冷却透平。

自1996年投入市场以来, 为了满足不断发展

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-I-0009-0009)。

Project Supported by National Science and Technology Major Project (J2019-I-0009-0009).

的市场需求, 西门子公司一直对该型燃机进行升级改进, 从而使该燃机始终保持市场竞争力。SGT5-4000F燃机经过多次技术升级后, 其输出功率已经由 240 MW<sup>[3]</sup> 提高到 329 MW<sup>[4]</sup>, 提高了 37.1%; 热效率由 37%<sup>[3]</sup> 提高到 41%<sup>[4]</sup>, 提高了 4 个百分点。功率和热效率的提高有助于用户降低燃料费用和运行成本, 提高运行经济性。

在升级改进过程中, 西门子一直遵循的指导原则是在综合考虑改进需求, 经过验证的最新材料技术、新设计技术、新加工制造技术的基础上, 充分借鉴现有燃机运行经验, 尽量保证燃机原有主要设计边界(包括气动边界和结构边界)不变, 确定改进潜力和改进升级的技术解决方案, 逐步提高燃机性能、改进燃机循环能力和运行灵活性、提高部件耐用性、扩展部件使用寿命。

基于上述指导原则进行燃机改进升级有以下优点: 1) 保证部件快速、便捷、可靠地安装; 2) 可基于试验数据, 将最新设计与前期设计直接对比, 确保技术验证的可信度; 3) 避免引入额外风险, 保证燃机运行的可靠性不会降低; 4) 可实现对在运机组的零部件替换, 实现旧机组的技术升级, 帮助客户降低运行成本, 提高运行灵活性。

本文在介绍 SGT5-4000F 燃机压气机、燃烧室和透平结构的基础上, 从 9 个方面详细介绍了该燃机的具体技术升级措施, 并对相关措施进行总结, 为后续自主燃机技术升级提供参考。

## 1 压气机技术升级措施分析

SGT5-4000F 燃机压气机为 15 级轴流式压气机, 通过进气导片调节实现流量调节和启动过程控制。压气机三维叶型考虑端壁附面层的影响, 故采用了端弯技术, 且所有叶片叶型均采用可控扩散叶型(controlled diffusion airfoil, CDA), 因此使得该压气机能在较少的级数下实现较高的总压比和效率<sup>[1]</sup>。

压气机主要技术升级是在 2004 年左右进行的, 主要通过修改压气机前 2 级动、静叶片和进口导叶共 5 排叶片的三维叶型, 使压气机进气流量和总压比得到了一定的提升, 故燃机有了更高的输出功率和排气能量。由于压气机通流没有进

行改动, 在叶型和安装角度的调整中, 可保持叶片安装结构和尺寸不变, 所以在现有运行的燃机停机大修期间就可完成相应的升级服务<sup>[5]</sup>。

另外, 为了适应压气机流量增加, 透平最后一级动叶安装角调整了 1.5°。图 1 为压气机升级后, 燃机部件的改动情况。

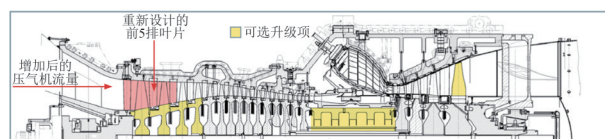


图 1 压气机的改进和升级

Fig. 1 Improvement and upgrade of compressor

据文献[5]介绍, 压气机流量增加后, 可使燃机输出功率增加 3%, 根据 SGT5-4000F 燃机流量敏感性分析结果, 估算在燃机其他输入条件不变时, 该压气机在采用上述升级措施后流量增加了约 3%。

此外, 由文献[6]可知, SGT5-4000F 燃机压气机在进行技术升级前后的流量分别为 670.9 kg/s 和 689.5 kg/s, 技术升级使压气机流量增加了 2.8%, 与估算结果基本一致。

## 2 燃烧室技术升级措施分析

### 2.1 燃烧器结构

1996 年, 首台 SGT5-4000F 燃机使用了带混合燃烧器的环形燃烧室 (hybrid burner ring combustor, HBR), 该燃烧室周向布置了 24 个干式低排放混合燃烧器, 其结构<sup>[7-8]</sup>如图 2 所示。

在上述燃烧室中使用的 HR3 型燃烧器采用了贫预混燃烧系统, 该系统采用中心扩散值班火焰

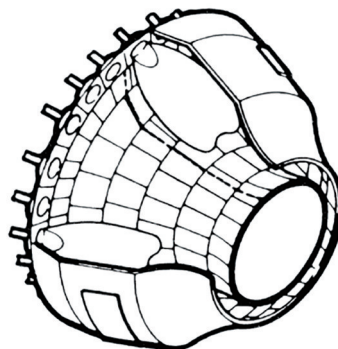


图 2 4000F 燃机环形燃烧室

Fig. 2 Ring combustor of 4000F gas turbine

来稳定燃烧，同时采用先进的贫预混火焰来减低 $NO_x$ 排放。采用这种燃烧技术可以扩展贫预混燃烧的运行范围<sup>[9]</sup>。图3给出了燃用天然气和液体燃料的双燃料HR3型燃烧器结构，主要由天然气和燃油喷嘴、天然气值班喷嘴和燃油值班喷嘴构成。燃烧器的运行状况和切换方式详见文献[2]。

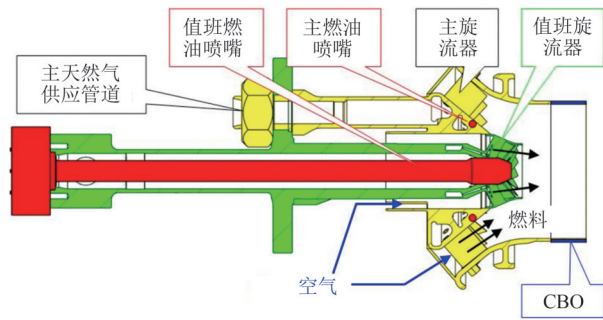


图3 HR3型燃烧器  
Fig. 3 HR3 burner

### 2.2 燃烧室升级简介

为满足市场需求，燃烧系统改进主要集中在

提高热力性能、降低污染物排放、提高机器运行灵活性和燃料灵活性等方面。改进过程中需要进行多次试验验证，以确保整个燃烧系统有更高的可靠性和最佳的燃烧性能。试验验证主要有以下部分：1) 常压条件下进行燃烧室冷态流量测试；2) 在燃烧试验台进行全尺寸低压、高压燃烧测试；3) 柏林测试工厂内进行燃烧系统的燃机台架测试等。经过上述试验验证后，相应的改进技术会逐步应用到商业运行上。图4为燃烧系统技术验证流程。

2000年对燃烧系统进行了第一次优化设计，将燃烧室的金属衬套更换为陶瓷隔热衬套 (ceramic heat shield, CHS)，由于陶瓷隔热衬套不需要进行冷却，故燃烧室冷却空气量降低了近30%。相应地，燃烧器也进行了适应性修改，在顶端引入了柱状燃烧器出口 (cylindrical burner outlet, CBO)设计<sup>[9-11]</sup>。

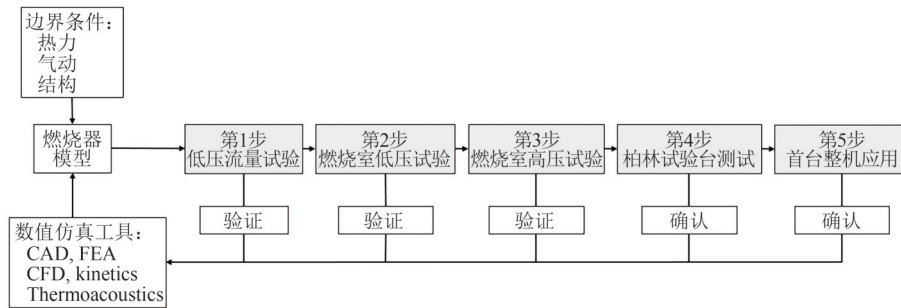


图4 燃烧系统技术验证流程

Fig. 4 Combustion system technology validation process

2005年重新匹配主旋流器以进一步降低燃烧室冷却空气量 (cooling-air reduced, CAR)，2006年引入了预混值班喷嘴，这2项措施使燃烧系统的 $NO_x$ 排放显著降低。2007年优化了燃烧器主旋流器气动外形，该项措施提高了燃烧系统热声稳定

性，进而提高了透平进口温度，并且还使燃烧系统适用于燃料预热以增加机组循环热效率。以上3项措施在2010年整体打包用于商业运行。图5为SGT5-4000F燃机燃烧系统的改进步骤，图6为降低 $NO_x$ 排放过程中的主要改进步骤。

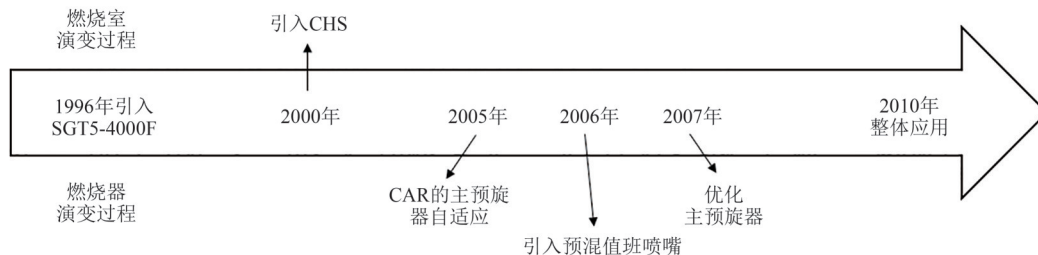


图5 燃机燃烧系统改进步骤

Fig. 5 Improvement steps of gas turbine combustion system

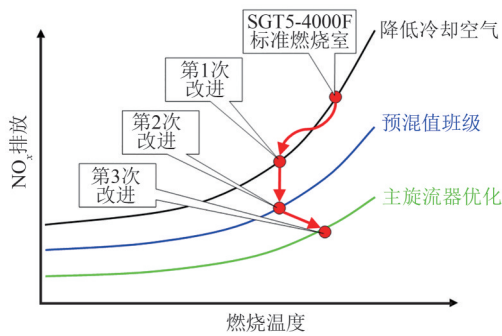


图6 燃烧系统降低 $\text{NO}_x$ 的主要改进步骤

Fig. 6 Main improvement steps for reducing  $\text{NO}_x$  in combustion system

### 2.3 降低燃烧室冷却空气量

SGT5-4000F 燃机燃烧室更换为陶瓷隔热块后, 虽然陶瓷隔热块本身不再需要空气冷却, 但是陶瓷块的固定弹簧片仍需要冷却, 此外还需要一部分空气去密封陶瓷块之间的缝隙, 防止高温燃气侵入陶瓷块之间的缝隙, 进而对金属内衬和金属外壳产生烧蚀。

图7标出了陶瓷块固定弹簧片需要修改的一些部位, 即在弹簧片热集中部位引入冲击孔, 虽增加了相应冷却空气流路(如图中带箭头的曲线所示), 但可以省去以前设计中采用的吹扫孔, 进而节省了约25%的冷却空气。

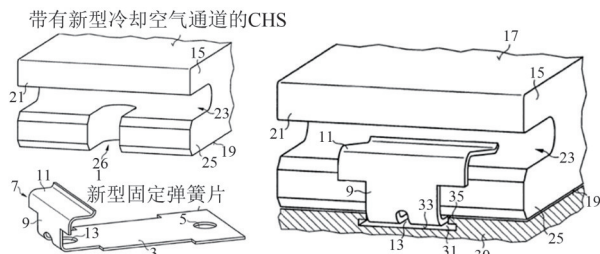


图7 燃烧室陶瓷块固定弹簧片的冲击冷却

Fig. 7 Impact cooling of ceramic fixed springs in combustion chamber

上述设计改进增加了燃烧器主进气量, 对燃烧系统的声学性能产生了显著影响。环形燃烧室火焰稳定机构不仅通过产生内部回流区稳定值班火焰, 而且通过外部回流区稳定主预混火焰。显然, 节省的25%冷气量会明显改变外部回流区的温度分布, 进而导致火焰形状和热释放速率的分布发生变化。

CFD分析表明, 调整冷气量后的燃烧室火焰

形状和基本结构的燃烧室火焰形状保持一致, 以便最大限度地减少燃烧系统燃烧动态特征的影响, 如图8所示。分析表明, 调整燃烧器CBO长度会对4000F环形燃烧系统的燃烧动态特征产生显著影响, 这也是最简单的修改方式。图8中间CFD结果就是加长CBO后的燃烧器火焰形状分布图。可以看出, 加长CBO后会导致火焰变短, 这和基本结构有明显差别。因此, 通过对主旋流器的旋流叶片数目和叶片气动形状角度进行稍微修改, 可以使火焰形状和时滞分布接近基本结构。

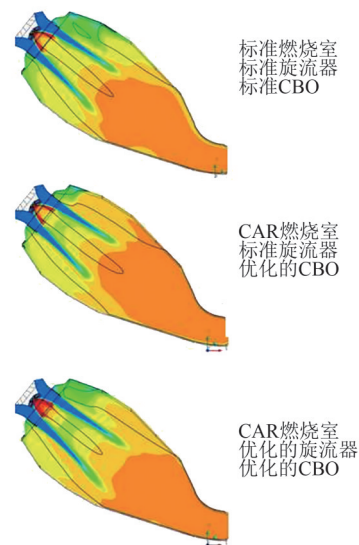


图8 环形燃烧室的温度分布图

Fig. 8 Temperature pattern in annular middle plane of combustor

### 2.4 采用预混值班喷嘴

SGT5-4000F 燃机引入市场时, 燃烧室使用的是HR3型燃烧器, 该燃烧器采用中心扩散值班火焰来稳定燃烧。该扩散值班火焰在燃烧区域产生了一个局部高温区, 且整个燃烧系统产生的 $\text{NO}_x$ 中很大一部分都是由这个高温区产生的。

为了进一步降低燃烧系统的 $\text{NO}_x$ 排放, 西门子公司在2006年设计并使用中心预混值班喷嘴来代替中心扩散值班喷嘴。该预混值班喷嘴是西门子公司发明的旋流器燃料喷射系统的改进型, 该喷嘴使用空心旋流叶片来分配所有值班用燃料, 同时增加了旋流器叶片数目来改善低负荷下燃烧室内气流的周向混合能力。另外, 为了降低机械设计和热声振荡等引起的风险, 尽量令该预混值

班喷嘴的位置保持不变。图9为预混值班喷嘴和扩散值班喷嘴出口燃料浓度分布对比图。

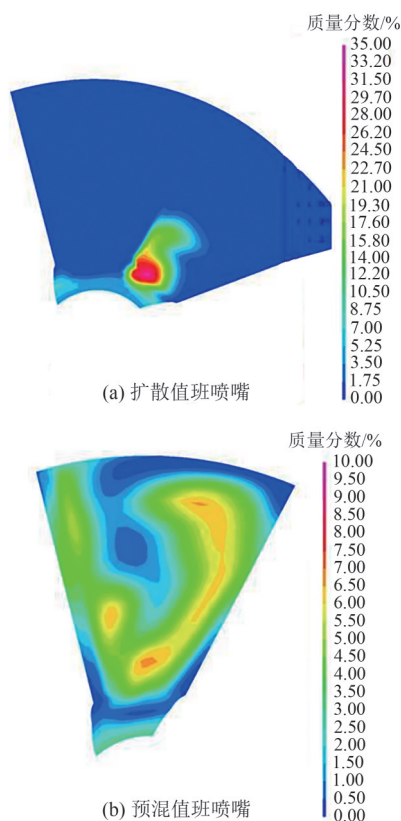


图9 扩散值班喷嘴和预混值班喷嘴出口燃料浓度分布对比图

Fig.9 Comparison of fuel concentration profiles at pilot swirler exit of diffusion pilot and premixed pilot

采用预混值班喷嘴后由于整个燃烧系统仅有2个燃料级,故有以下优点:1)  $\text{NO}_x$ 排放降低了近30%;2)直接降低了相关的运行费用;3)由于2个天然气燃料级在所有负荷范围内都在运行,故会减少预混值班喷嘴停止运行后进行吹扫喷嘴内剩余燃料的步骤,因此燃机装置也减少了一套吹扫系统。

### 2.5 主旋流器的优化

主旋流器优化目的主要为:1)提高火焰温度,进而提高机组循环效率;2)增加燃烧系统韦伯数的允许调节范围,特别是燃机使用非预热燃料进行启动,之后在联合循环过程中转换为预热燃料时,不再需要对燃烧系统的硬件进行调整。

主旋流器优化的参数主要包括旋流叶片数、叶片扭角、喷射孔尺寸、喷射孔直径等。优化后

的主旋流器经过多次试验验证后才用于商业运行。图10为2种优化后的主旋流器CFD模拟和试验验证对比图。图10(a)、(c)为激光诱导荧光(laser-induced fluorescence, LIF)试验验证结果,图10(b)、(d)为CFD仿真结果。通过对比可知,试验结果和仿真结果总趋势基本一致。

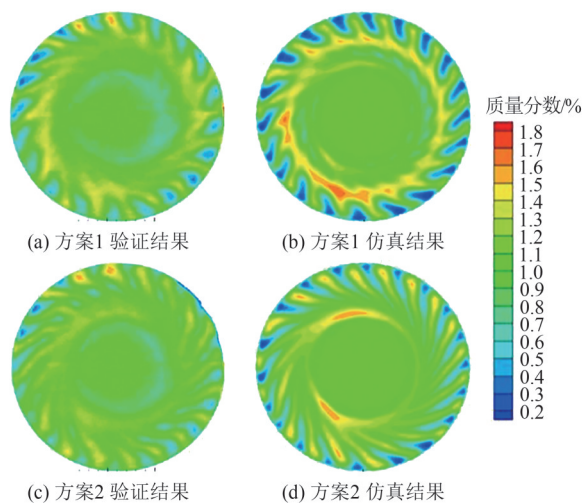


图10 2种改进结构形式的主旋流器CFD模拟和试验测试对比图

Fig.10 Comparison of CFD simulation and experimental test of two improved structural forms of main cyclones

采用优化后的主旋流器可使燃机出力增加2%,  $\text{NO}_x$ 排放降低10%。

### 2.6 改进结果对比

上述3项燃烧系统的改进措施被整体用在SGT5-4000F燃机上并投入商业运行,3项改进措施使燃机总  $\text{NO}_x$ 排放降低了50%以上,输出功率提高了8%以上<sup>[12]</sup>。

## 3 透平技术升级措施分析

### 3.1 主要升级技术措施

SGT5-4000F燃机采用四级空气冷却透平,其冷却空气来自压气机级间抽气。由于F级燃机的透平前燃气初温很高(一般在1400℃以上),因此透平第一级和第二级静叶以及第一级动叶采用气膜冷却,同时叶片喷涂隔热涂层(thermal barrier coating, TBC)。第一级动叶采用单晶铸造成型,第二、三级动叶采用定向结晶铸造成型,第四级

动叶没有空气冷却, 它是不带围带和拉筋的自由叶片, 也采用精密铸造成型<sup>[13-15]</sup>。

SGT5-4000F 燃机热通道部件卓越的可靠性有助于提升整机可靠性, 同时部件耐用性也是燃机运行灵活性的关键, 最近十余年获得的现场运行经验有助于进一步提升部件可靠性和耐用性。此外, 提升燃机性能的关键是节省热部件某些过渡区域的冷却密封空气量, 节省的冷却空气会降低燃烧室的火焰温度, 也会提高燃机性能, 而透平前排叶片处燃气温度的相应降低还有助于提高服务的灵活性。

SGT5-4000F 燃机在最近升级过程中采取的技术措施主要有以下 5 项:

1) 使用液压间隙优化 (hydraulic clearance optimization, HCO) 技术控制透平工作状态的叶尖间隙。

2) 应用最新的高性能热障涂层, 该涂层性能已经在西门子不同类型的燃机和柏林试验台上进行了验证。

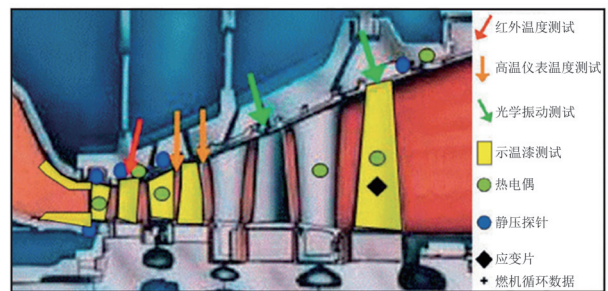
3) 对透平叶片上各部位的涂层厚度进行了优化, 避免了局部过热现象。该优化技术已经在西门子其他型号燃机上成功运行了 50 000 h。

4) 采用最新的精密铸造技术, 同时保证叶片的气动设计不发生改变。

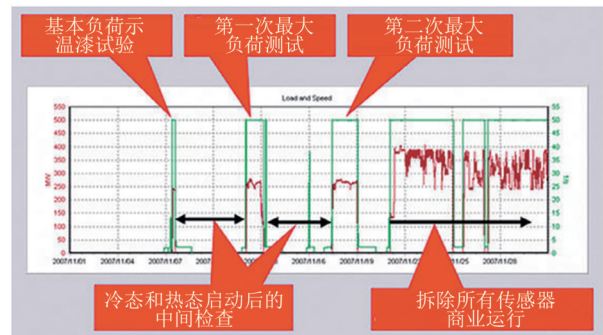
5) 采用了在其他燃机上已经使用并被证实安全可靠的叶片密封片。

以上技术改进措施在进一步测试中又得到了验证, 这些测试项目主要的测试方法和测试位置<sup>[16]</sup>如图 11 所示。

上述改进措施在 4000F 燃机所有相关运行状态下都进行了成功测试, 这些运行状态包括: 基本负荷、部分负荷、冷态启动、温态启动和热态启动等。在上述测试期间内还对测试部件进行了中间检查, 这些检查主要用于示温漆评估以及考虑安全原因而对测试设备进行的调整。在成功完成所有测试项目后, 燃机交付给用户用于商业运行, 在之后长期验证过程中, 当燃机运行 2 000 h 和 4 000 h 后分别进行了停机检查。检查结果表明, 升级部件运行状况非常良好。



(a) 透平测试测点布置示意图



(b) 透平不同部位温度测试结果

图 11 SGT5-4000F 燃机升级过程中的测试项目

Fig. 11 Testing program for SGT5-4000F upgrade

### 3.2 使用 HCO 控制叶尖间隙

2005 年西门子首次使用了 HCO 技术控制透平工作状态叶尖间隙, 进一步提升燃机热效率。该 HCO 系统通过液压控制机构, 在燃机运行过程中, 控制整个转子向压气机方向移动, 从而使得透平叶尖间隙减小, 压气机叶尖间隙增大。据报道, 透平间隙减小可使透平效率增加 0.35 个百分点, 压气机间隙增大会导致压气机效率降低 0.15 个百分点<sup>[17]</sup>。根据 SGT5-4000F 燃机部件效率敏感性分析结果, 可以估算出在燃机其他输入条件不变时, 使用主动间隙控制技术后会使燃机功率增加约 0.6%。

### 3.3 减少密封空气

本次修改主要是对透平第四级密封系统进行改进以减少密封空气量, 如图 12 所示。这些密封设计已经在西门子其他燃机上进行了长期应用, 累计达到了 5 200 000 h, 因此对其密封效果有了非常清晰的认识, 可以准确预测相应密封空气的减少量。

在整机热变形过程中, 新密封设计对透平护环和透平间隙的影响可通过整机热分析进行预测。为验证设计模型准确度, 还在相关位置布置了热电偶来监测相关位置温度场, 测试数据也进一步证实了设计结果。

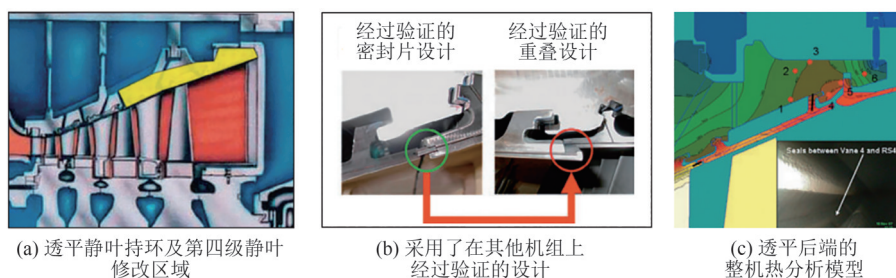


图 12 透平后面级密封系统改进

Fig.12 Modification of the sealing system of the rear turbine stages

### 3.4 改进燃烧室出口和透平一级静叶间的过渡区

燃烧室出口和透平一级静叶间过渡区的设计改进得益于热障涂层的最新发展、现场运行经验以及在其他部件上经过证实的设计特征。图 13 为 4000F 燃机一级静叶在运行 25 000 h 后的状况，从图中可以看出，一级静叶运行状况基本良好，但在静叶平台个别部位还有改进部件耐用性的潜力。

因此改进的主要任务是：

- 1) 降低一级静叶平台热负荷，提升部件的运行耐用性；
- 2) 进一步节省冷却空气。

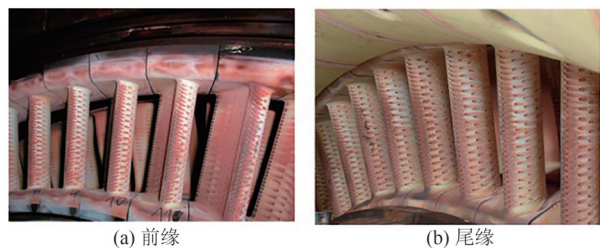


图 13 运行 25 000 h 后的一级静叶

Fig.13 Vane 1 after 25 000 h of operation

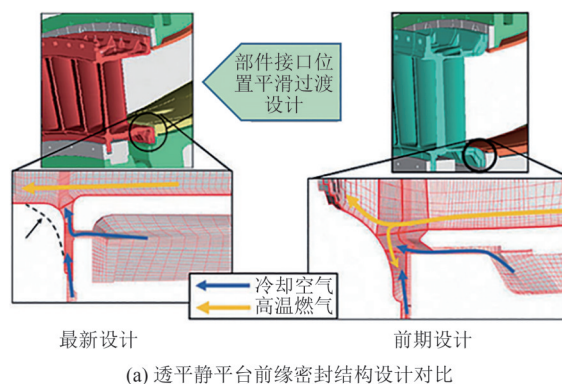
一级静叶平台前缘由燃烧室出口和一级静叶间的间隙喷射出的空气进行冷却，改进前后的密封结构和 CFD 分析如图 14 所示。

通过 CFD 计算分析以及现场运行数据，可以找到一级喷嘴各部位的高温区域，进而可以改进燃烧室出口和透平一级喷嘴接口处的几何设计并降低相应位置的密封冷却空气量。

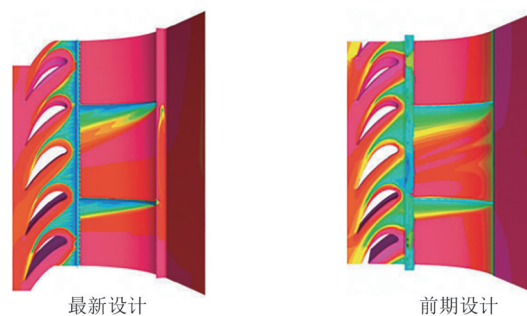
### 3.5 改进透平一级动叶

透平一级动叶改进的主要目的是节省冷却空气量，增加其运行小时数和启动次数。主要措施为：

- 1) 使用在 SGT6-4000F 燃机上经过验证的一级动叶铸造技术来铸造 SGT5-4000F 燃机一级动



(a) 透平静叶平台前缘密封结构设计对比



(b) 改进密封结构后的一级静叶平台处的温度场 CFD 分析结果对比

图 14 一级静叶平台前缘冷却设计对比

Fig. 14 Cooling design comparison for leading edge of vane 1

叶，以提高燃机频繁启动次数。

- 2) 使用最新的热障涂层。该涂层不仅可提高燃气温度，降低冷却空气量，同时还不会降低叶片的循环寿命。

### 3.6 改进透平四级动叶

透平四级动叶的改进目标是提高动叶的耐用性，并将其寿命提高 33%。这就需要提高部件的长期抗腐蚀能力和抗蠕变能力。主要改进措施为修改四级动叶气动叶型，改善其气动性能；使用高性能抗腐蚀涂层。

但在使用高性能叶片涂层后，会改变动叶的质量分配，因此为了使叶片根部与转子盘接触部

位的应力水平和以前保持一致,就需要使用改进的铸造技术对叶片质量进行重新分配以满足应力要求。

## 4 结论

通过对SGT5-4000F燃机相关文献和资料的收集整理,基本获得了SGT5-4000F燃机各部件的主要改进措施,具体如下:

1) 通过修改压气机前2级动、静叶片和进口导叶共5排叶片的3D叶型,使得压气机进气流量和总压比得到了一定的提升。

2) 将燃烧室的金属衬套更换为陶瓷隔热衬套,由于陶瓷隔热衬套不需要进行冷却,故燃烧室的冷却空气量降低了近30%。

3) 在陶瓷隔热块之间固定弹簧片热集中的部位引入冲击孔,使得以前设计中采用的吹扫孔就可以全部省去,进而节省了约25%的冷却空气。

4) 引入预混值班喷嘴,使燃烧系统的 $\text{NO}_x$ 排放显著降低。

5) 修改燃烧器主旋流器的气动外形,提高了燃烧系统热声稳定性以及透平进口温度。

6) 使用HCO技术控制透平运行时的叶尖间隙,提升了燃机热效率。

7) 改进透平第四级空气密封系统,减少了密封空气量。

8) 改进燃烧室出口和透平一级静叶间的过渡区,节省了冷却空气量,同时提升了部件耐用性。

9) 采用经过验证的铸造技术和热障涂层,节省了透平一级动叶冷却空气量,增加了运行小时数和启动次数。

10) 修改四级动叶气动叶型,改善其气动性能,同时使用高性能抗腐蚀涂层,以提高四级动叶的耐用性。

上述改进升级措施可作为我国自主重型燃机及其衍生型号未来进行改进升级的技术参考和设计依据。

## 参考文献

[1] BECKER B, TERMUEHLEN H. Evolution of Siemens gas turbine technology[C]//Power Generation

International Conference. New Orleans, USA: ASME, 1996: 358-369.

[2] 徐强, 崔耀欣, 张楹. V94.3A燃气轮机的技术分析[J]. 热力透平, 2006, 35(3): 169-174.

XU Q, CUI Y X, ZHANG Y. Technical analysis of V94.3A gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2006, 35(3): 169-174.

[3] Pequot Publishing. Gas turbine world 1996 GTW handbook[M]. Guilford: Globe Pequot Press, 1996.

[4] Pequot Publishing. Gas turbine world 2022 GTW handbook[M]. Guilford: Globe Pequot Press, 2022.

[5] Siemens. Compressor mass flow increase upgrade for SGT5-4000F Gas Turbine[R]. Munich: Siemens, 2005.

[6] Pequot Publishing. Gas turbine world 2005 GTW handbook[M]. Guilford: Globe Pequot Press, 2005.

[7] BECKER B, SCHULENBERG T, TERMUEHLEN H. The 3A-series gas turbines with HBR combustors[C]//ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Houston, Texas, USA: 1995, ASME: 1123-1131.

[8] PRADE B, STREB H, BERENBRINK P. Development of an improved hybrid burner-initial operating experience in a gas turbine[C]//ASME Turbo Expo. Birmingham, UK: ASME, 1996: 958-963.

[9] STREB H, PRADE B, HAHNER T. Advanced burner development for the Vx4.3A gas turbines[C]//ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air. Louisiana, USA: ASME, 2001: 369-378.

[10] KREB W, FLOHR P, PRADE B. Thermoacoustic stability chart for high-intensity gas turbine combustion systems[J]. Combustion Science and Technology, 174(7): 99-128.

[11] HERMSMEYER H, PRADE B, GRUSCHKA U, et al. V64.3A gas turbine natural gas burner development [C]//ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air. Amsterdam, The Netherlands: ASME, 2002: 301-316.

[12] BORIS F K, BERND P, BENJAMIN W. Combustion system update SGT5-4000F- design, testing & validation[C]//ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. San Antonio, Texas, USA: ASME, 2013: 1213-1224.

[13] 杨顺虎. 燃气-蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

YANG S H. Gas and steam combined cycle power generation equipment and operation[M]. Beijing:

China Electric Power Press, 2003.

- [14] 徐强, 张楹. 西门子V94.3A燃气轮机的技术特点[J]. 燃气轮机发电技术, 2006, 8(2): 36-43.  
XU Q, ZHANG Y. Technical characteristics of Siemens V94.3A gas turbine[J]. Gas Turbine Power Generation Technology, 2006, 8(2): 36-43.
- [15] 刘杨, 李旭光. 基于西门子V94.3A型燃气轮机大修研究[J]. 东北电力技术, 2021, 42(3): 41-43.  
LIU Y, LI X G. Research on overhaul based on Siemens V94.3A gas turbine[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(3): 41-43.
- [16] HAJRUDIN C, SAN S, THOMAS J, et al. Latest performance upgrade of the siemens gas turbine SGT5-4000F[R]. Munich: Siemens, 2005.
- [17] BERNARD B. Robust gas turbine design[R]. Siemens, 2002.

收稿日期: 2024-06-18。

修回日期: 2024-08-28。

作者简介:



史玉恒

史玉恒(1981), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事燃气轮机总体性能仿真技术开发、整机性能分析和整机试验研究等工作, shiyuheng1981@126.com;



刘润泽

刘润泽(1984), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为燃气轮机空气系统与整机热分析, liurunze@spic.com.cn;



李士龙

李士龙(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为燃气轮机及联合循环总体性能仿真, lishilong@spic.com.cn;



蒋东翔

蒋东翔(1963), 男, 博士, 教授, 研究方向为转子动力学与故障诊断, jiangdx@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)