

# 重型燃气轮机技术现状及发展趋势探析

陈 烨

(广东粤电滨海湾能源有限公司, 广东 东莞 523932)

**摘 要** 本研究系统阐述了重型燃气轮机的技术发展现状及未来发展方向。我国在 F 级重型燃气轮机自主研发领域取得重大突破, 成功实现了从技术引进到自主创新的转型升级。在高温材料、低碳燃烧、智能运维等关键技术领域, 国产燃气轮机性能已逐步接近国际领先水平。未来行业将重点围绕低碳化、智能化、高效化三大发展方向, 其中氢能适配技术、智能运维系统、增材制造工艺等将成为核心技术攻关重点。当前仍需着力突破若干核心部件技术瓶颈, 健全产业链协同创新体系, 以加快推进重型燃气轮机的完全自主化进程。

**关键词** 重型燃气轮机; 结构创新; 材料升级; 智能控制

中图分类号: TK47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.036

## 0 引言

重型燃气轮机作为大型发电站和工业动力源的核心设备, 其高效能和可靠性对国家能源安全具有战略意义。它被誉为装备制造业“皇冠上的明珠”, 代表了国家重工业的最高技术水平<sup>[1-2]</sup>。随着全球能源转型加速, 燃气轮机凭借清洁高效、灵活调节的优势, 在可再生能源占比提升的电力系统中发挥着不可替代的调峰作用。我国天然气发电量近十年以 9.9% 的年均增速增长, 但在总发电量中占比仅 3.2%, 远低于全球 23% 的平均水平<sup>[3]</sup>, 未来发展空间巨大。

重型燃气轮机的技术水平和创新能力直接关系到国家的能源安全、装备制造水平和国防实力。长期以来, 全球重型燃气轮机市场被美国通用电气、德国西门子、日本三菱重工等国际巨头垄断。近年来, 我国通过国家科技重大专项实施, 在重型燃气轮机领域实现了从技术引进到自主创新的历史性跨越。2024 年 300 MW 级 F 级重型燃气轮机样机总装下线, 标志着我国成为全球第五个掌握重型燃气轮机完整设计制造技术的国家<sup>[4]</sup>。本文系统梳理国内外重型燃气轮机技术现状, 分析关键突破领域, 并展望未来发展趋势。

## 1 重型燃气轮机技术现状

### 1.1 全球技术格局

国际重型燃气轮机技术已形成以通用电气、西门子、三菱重工三大巨头为主导的竞争格局, 技术路线呈现高效率、低排放、多燃料兼容的发展趋势(见表 1)。目前, 国际最先进的重型燃气轮机透平进口温度已经高达 1 600 °C, 单循环效率最高可达 44%, 联合循环效率更

是突破 64%, 氮氧化物排放浓度降至 25 mg/Nm<sup>3</sup> 以下<sup>[5]</sup>, 技术特征主要体现在三个方面:

1. 结构创新: GE 的 HA 型燃机采用轴流分级燃烧设计和三维气动设计叶片, 降低排放, 提高气动效率; 西门子 HL 级燃机改进透平内部冷却结构和模块化热障涂层, 提高耐高温性能; 三菱 JAC 系列燃机则通过增强型空冷系统, 将透平工作温度大幅提升。

2. 材料升级: 陶瓷基复合材料(CMC)在燃机透平叶片中的应用成为突破重点, 相比传统镍基合金可承受温度大幅度提高, 降低冷却空气消耗量, 显著提升热效率。

3. 智能控制: 预测性维护系统通过实时监测数千个传感器数据, 结合机器学习算法实现故障预警, 使计划外停机可能性大幅降低, 减少维修成本。

### 1.2 国产化技术突破

我国重型燃气轮机发展经历了从技术引进到自主创新的艰难历程。通过国家科技重大专项“重型燃气轮机”工程, 构建“小核心、大协作”的创新联合体, 汇聚国内多家企业、科研院所及高校创新力量进行协同攻关, 在多个功率等级实现突破:

1. 能源动力领域: 国家电投 300 MW 级 F 级重型燃气轮机采用 5 万余个零部件, 通过正向设计实现核心技术自主掌控, 技术指标与国际主流同级别机型相当<sup>[6-7]</sup>。东方电气 F 级 50 MW 重型燃气轮机 G50 实现 1 300 °C 高温稳定运行, 联合循环一小时发电量超 7 万千瓦时, 较燃煤机组单台年减排 50 万吨碳<sup>[8]</sup>。杭汽轮 HGT51F 型拥有完全自主知识产权, 10 余项性能指标达国际先进水平, 热效率超 35%。

表 1 全球领先重型燃气轮机性能对比

| 制造商  | 设备型号        | 联合循环功率 (MW) | 联合循环效率 (%) | 技术特点             | NOx 排放 (mg/Nm <sup>3</sup> ) |
|------|-------------|-------------|------------|------------------|------------------------------|
| 通用电气 | 9HA.02      | 838         | 64.1       | 三维气动叶片、轴流分级燃烧    | ≤ 15                         |
| 西门子  | SGT5-9000HL | 880         | 64         | 3D 打印叶片、多层防护涂层   | ≤ 25                         |
| 三菱重工 | M701JAC     | 650         | 64         | 增强空冷系统、超厚 TBC 涂层 | ≤ 25                         |
| 安萨尔多 | GT36-S5     | 760         | 62.6       | 顺序燃烧技术、一体式焊接转子   | ≤ 25                         |

2. 舰船动力领域：中船重工 CGT40 (43 MW) 通过严格测试，可满足十万吨级航母动力需求；中国航发“太行 25”实现单台安全运行超 20 000 小时，累计发电超 3.2 亿度，兼具高可靠性与易维护性。

这一系列成就标志着我国已掌握重型燃气轮机的自主设计、制造和试验验证能力，对保障国家能源安全、推动绿色低碳发展、提升高端装备制造水平具有重大战略意义。但需注意的是，我国在单晶叶片制造、高温涂层工艺及高效冷却设计等部分核心技术上，技术成熟度与国外仍有一定差距，透平叶片寿命周期对比国际先进水平也存在一定差别，这亦是我国高端装备制造领域需要突破的重要挑战。

## 2 关键技术领域进展

### 2.1 高温材料与先进制造

材料技术突破是提升燃气轮机性能的基础，主要体现在三个层面：

1. 高温合金研发：透平前燃气温度每提高 100 °C，可提高燃气轮机输出功率 20% ~ 25%，同时节省燃料 6% ~ 7%<sup>[9]</sup>，因此高温合金的研发，对于提升燃机效率极为重要。重型燃气轮机叶片材料从承温低的铁基、高成本钴基高温合金发展为如今主流的镍基高温合金，通过对强抗热腐蚀定向和单晶高温合金的研制、高温合金材料体系等方向的研究来提高叶片的抗氧化、抗腐蚀以及抗高温性能。

2. 制造工艺创新：增材制造技术实现复杂构件一体化成型，通过 3D 打印生产具有微孔冷却通道的透平叶片，使气动效率有一定提升<sup>[10]</sup>；激光选区熔化技术制造 DLN 燃烧器，能够大幅缩短交付周期，降低制造成本。

3. 表面处理技术：热障涂层技术 (TBC) 是在透平叶片表面喷涂热障涂层，从而降低叶片表面温度，提高透平进口温度，增强抗高温氧腐蚀能力，延长服役寿命，是与先进高温结构材料、高效冷却技术并重的燃机透平叶片关键技术。

### 2.2 低碳燃烧与高效冷却

为适应能源低碳转型需求，燃烧与冷却技术向低排放、高适应性方向发展：

1. 灵活燃料燃烧：干式低氮燃烧系统实现宽区间负荷调节范围，大幅度降低 NOx 排放；微混合燃烧室通过分布式小火焰结构，解决氢燃料燃烧回火难题，使氢气混烧比例提升至 50%。

2. 先进冷却结构：微尺度冷却技术通过在透平叶片表面布置微米级气膜孔，显著增大换热面积并优化气流组织，使得冷却效率大幅提升；热管冷却系统利用相变传热原理，使叶片前缘温度降低；全覆盖气膜冷却技术通过结合精细冲击冷却设计，在提升冷却均匀性的同时，减少冷却空气消耗，提升整机效率。

### 2.3 智能运维与系统集成

数字化技术深刻改变燃气轮机运行管理模式：

1. 预测性维护系统：基于深度学习的故障诊断模型通过分析振动频谱、排气温度场等特征参数，实现早期故障识别准确率超 90%。数字孪生技术构建虚拟映射系统，对剩余寿命预测误差小于 5%，使维修成本降低 30%<sup>[11]</sup>。

2. 运行优化控制：协同大数据分析结合深度学习算法形成自适应控制系统根据大气条件、电网负荷变化实时调整压气机进气角度及燃料分配，保持最佳燃烧效率区间。结合远程监控平台实现多电站协同调度，极大地减少电网调频指令响应时间。

## 3 重型燃气轮机技术发展趋势分析

### 3.1 低碳化与燃料灵活性

1. 低碳化：在全球能源转型和“双碳”目标驱动下，氢能融合技术成为重型燃气轮机发展的行业研发焦点，通用 HA 系列燃机已实现 50% 氢燃能力，并计划于 2030 年达成 100% 全氢燃烧。国内企业也在积极攻关，东方电气 G50 燃机已实现 30% 氢气掺烧，燃烧效率提升 5% 的同时，碳排放减少 30%。通过多级喷射控制火焰速度，

氨气裂解燃烧技术实现零碳发电,三菱正在开发40%氨混燃系统,计划2030年完成示范验证。

2. 碳捕集:通过燃烧后捕集系统捕捉燃机排气中的二氧化碳,通过不断优化碳捕集工艺,逐步降低发电过程中的碳排放量,最终实现净零排放,为绿色能源发展提供关键技术支撑。

### 3.2 智能化与数字赋能

1. 智慧协同系统:基于人工智能的强化学习算法,统筹电网与可再生能源、储能系统一体化运营需求,整合燃料成本、上网电价等信息,依托大数据分析,优化运行模式,降低运营成本,提升运营效益。

2. 数字孪生应用:将人工智能引入智慧电厂系统集成设计参数、制造数据、运行状态,实现性能衰退精准预测,提升运维效率。通过人工智能建立部件全溯源体系,为设备维保决策提供数据支撑。

3. 远程协同维护:依托高速无线通信技术结合AR辅助维修系统,通过智能眼镜实现云端专家指导现场维修操作,提升现场维修效率。

### 3.3 高效化与系统创新

1. 增材制造突破:增材制造技术依托数字模拟仿真与人工智能的深度融合,实现复杂三维结构的快速与精密成形,显著加速了产品的验证与研制进程。这一技术不仅革新了制造工艺本身,更驱动了零件设计的系统性变革,实现了结构精简、轻量化、耐用性提升及全生命周期成本的整体优化。

2. 结构材料及涂层优化:结构材料与涂层技术的持续发展,始终是推动现代重型燃气轮机效率与性能稳步提升的核心基石。高温金属合金定向凝固技术和单晶技术水平的提升极大地提高了材料的承温能力,使燃机的透平进气温度有了较大的飞跃。陶瓷基复合材料在高温性能、轻量化、耐腐蚀及力学性能与韧性等方面展现出传统材料难以比拟的综合优势。热障涂层技术的迭代也将使得材料朝着高熔点、低热导率、低弹性模量、低烧结速率和高损伤容限等方向提升<sup>[12]</sup>。

3. 新型动力循环:电—氢—电转换系统通过整合电解水制氢与氢能发电技术,有效平抑可再生能源的波动性与间歇性。该系统在新能源富余时利用电能制取绿氢,在电力短缺时则通过氢能发电实现稳定供电,从而增强电网对高比例可再生能源的消纳能力。在燃料电池—燃气轮机混合发电系统中,燃料电池取代了传统燃烧室,构成系统的“前置循环”,直接将化学能高效转化为电能;燃气轮机则利用燃料电池排出的

高温废气进一步做功发电,形成“后置循环”。这种协同配置突破了单一能量转换方式的效率极限,可实现系统整体效率超过70%。

## 4 结束语

重型燃气轮机技术正经历深刻变革,在材料科学、制造工艺、智能控制等多领域协同突破下,国产重型燃气轮机实现了从技术引进到自主创新的历史性跨越。国产300 MW级F级重型燃气轮机完成正向设计,标志着我国成为全球少数掌握完整重型燃气轮机设计制造技术的国家。面向未来,低碳化、智能化、高效化成为主要发展趋势,氢能应用、智能算法与数字孪生、新型循环等技术将重塑产业格局。当前我国重型燃气轮机产业仍面临材料制备、核心部件、验证体系等方面的挑战,需要积累高性能先进设备的设计、制造经验,重点对低碳燃烧和智能运维、燃气轮机增材制造、结构材料及涂层等领域进行研究,促进研发高性能的重型燃气轮机。重型燃气轮机不仅将继续支撑电力、船舶、工业等关键领域,更将成为全球能源转型的重要推动力,为“双碳”目标实现做出重要贡献。

## 参考文献:

- [1] 束国刚,余春华,沈国华,等.新时期我国重型燃气轮机发展研究[J].中国工程科学,2022,24(06):184-192.
- [2] 杨巧云.燃气轮机发电技术综述[J].内燃机与配件,2016(12):33-35.
- [3] 朱兴珊,沈学思,李天一,等.“受气”的天然气发电[J].中国石油石化,2025(01):43-46.
- [4] 国内最大功率重型燃气轮机样机在沪总装下线[J].上海质量,2024(03):85.
- [5] 蚁建荣,何宗泽,程芳林,等.H级燃气轮机的发展现状及技术特点分析[J].热能动力工程,2022,37(10):1-15.
- [6] 同[4].
- [7] 同[5].
- [8] 首台国产F级50MW重型燃气轮机首次点火成功[J].电子质量,2023(01):52.
- [9] 胡彬彬,王臻.燃气轮机热端部件用高温合金的研究进展[J].科技与创新,2024(17):107-109.
- [10] 帅三三,李石磊,玄伟东,等.重型燃气轮机涡轮叶片材料及制造技术研究进展[J].热力透平,2022,51(03):161-169.
- [11] 王志涛,郑子惊,张靖凯.基于数字孪生的燃气轮机多维度多领域建模方法的发展[J].航空发动机,2025,51(02):1-9.
- [12] 孔祥林,高进,赵仕志.工业燃气轮机先进技术现状及发展趋势[J].世界石油工业,2024,31(04):120-128.