DOI: 10.19666/j.rlfd.202512039

掺氢燃烧对 SGT800 燃气轮机联合循环机组热力性能影响的仿真研究

倪玉舟[1]，张俊锋[1]，熊 莉[2]，涂垚杰[2]
（1. 国家电投集团荆门绿动能源有限公司，湖北 荆门 448000；
2. 华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074）

［摘 要］【目的】随着全球碳减排趋势的深化及氢能规模化应用的推广，对现有燃气轮机机组进行掺氢燃烧技术改造是实现发电供暖行业能源低碳转型的重要途径。【方法】基于 Ebsilon 热力系统仿真平台，搭建了某燃气轮机热电联产电厂 SGT800 双压无再热联合循环机组的热力系统模型，在维持总输入燃料热量与透平入口温度恒定的条件下，系统探究了氢气掺混比例（0~50%，质量比）与燃气轮机负荷率双重因素对联合循环系统运行参数以及热力性能的影响规律。【结果】仿真结果表明：随着氢气掺混比例的提高，燃料质量流量逐渐减小，同时为保证透平入口温度不变，燃气轮机入口的过量空气系数也要相应降低。然而，透平排烟温度、流量及其热量并没有随掺氢比例的提高而单调变化，这是系统为维持恒定透平入口温度而动态调整冷却空气流量导致的结果。在 100%燃气轮机负荷率及最大抽凝工况下，燃气轮机发电效率以及联合循环系统效率均在掺氢比为 20%附近达到最大值，其分别为 41.05%和 80.79%，相较于纯天然气工况分别上涨 1.38%和 1.16%。进一步考察机组变负荷条件下掺氢燃烧对系统运行参数的影响，发现当掺氢比例从零提升至 50%时，100%、80%和 60%燃机负荷率下燃机发电效率分别提升 1.38%、1.28%和 1.12%，同时联合循环系统效率分别提升 1.16%、1.08%和 0.92%。【结论】掺氢对机组性能的影响呈现出一种复杂的、具有双重维度的负荷依赖性。在高负荷区，掺氢通过优化燃烧过程，最大化机组的绝对效率增益；在低负荷区，掺氢抬升机组的性能底线，保障其在深度调峰工况下的经济可行性。

［关 键 词］联合循环；掺氢燃烧；Ebsilon；热力性能

［引用本文格式］倪玉舟，张俊锋，熊莉，等. 掺氢燃烧对 SGT800 燃气轮机联合循环机组热力性能影响的仿真研究[J]. 热力发电，2026，55(7)：86. Ni Y Z, Zhang J F, Xiong L, et al. Simulation study of the effect of hydrogen cofiring on thermal performance of an SGT 800 gas turbine combined cycle unit[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(7): 86.

Simulation study of the effect of hydrogen cofiring on thermal performance of an SGT 800 gas turbine combined cycle unit

Ni Yuzhou[1], Zhang Junfeng[1], Xiong Li[2], Tu Yaojie[2]
(1. State Power Investment Group Jingmen Green Power Energy Co., Ltd., Jingmen 448000, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] With the deepening of global carbon reduction trends and the promotion of large-scale hydrogen application, the retrofitting of hydrogen blending combustion technology for existing gas turbine units is an important and promising approach to achieving the low-carbon energy transformation in the power and heating sectors. [Methods] This study constructs a thermal system model based on the Ebsilon thermal system simulation platform for an SGT800 dual-pressure non-reheat combined cycle unit of a combined heat and power (CHP)

收 稿 日 期：2025-12-12 修 回 日 期：2026-01-15 接 受 日 期：2026-01-20 网络首发日期：2026-02-05
基 金 项 目：国家电投小 F 级燃机联合循环机组多热源耦合的梯级利用灵活高效供热研究项目（116989JX0120240091）
Supported by：Research Project on Flexible and Efficient Heat Supply through Cascade Utilization of Multi-heat-source Coupled Small F-class Gas Turbine Combined Cycle Units of State Power Investment Corporation (116989JX0120240091)
第一作者简介：倪玉舟（1989），男，工程师，主要研究方向为燃机燃烧调整及控制策略，306247401@qq.com。
通信作者简介：涂垚杰（1989），男，博士，副教授，主要研究方向为能源系统节能优化，tuyaojie@hust.edu.cn。

cogeneration gas turbine power plant. The influence laws of hydrogen blending ratio (0~50%, mass basis) and gas turbine load rate on the system operating parameters as well as thermal performance of the combined heat and power system are investigated systematically under the condition of keeping the total fuel heat input and turbine inlet temperature constant. [Results] The results show that as the H_2 blending ratio increases, the fuel mass flow rate gradually decreases. To keep the turbine inlet temperature unchanged, the excess air coefficient at the turbine inlet must be reduced accordingly. However, the turbine exhaust temperature, flow rate and heat do not monotonically change with the increase of hydrogen blending ratio. This is the result of the dynamic adjustment of the cooling air flow rate of the system to maintain a constant turbine inlet temperature. Under the 100% gas turbine load rate and maximum extraction-condensing working condition, the gas turbine power generation efficiency and the combined cycle system efficiency reach their maximum values of 41.05% and 80.79% at nearly 20% hydrogen blending ratio respectively, which are 1.38% and 1.16% higher than those in the pure-natural-gas combustion working condition. Further examination of the influence of hydrogen blending combustion under variable load conditions of the unit on system operating parameters reveals that, when the hydrogen blending ratio increases from 0 to 50%, the gas turbine power generation efficiency increases by 1.38%, 1.28% and 1.12% at gas turbine load rates of 100%, 80% and 60% respectively, and the combined cycle system efficiency increases by 1.16%, 1.08% and 0.92% respectively. [Conclusion] Overall, the effect of hydrogen blending combustion on the performance of the CHP gas turbine combined cycle unit exhibits a complex and dual-dimensional load-dependent characteristic. In the high-load range, hydrogen blending provides optimization to the combustion process to maximize the absolute efficiency gain of the unit, and in the low-load range, hydrogen blending raises the performance baseline of the unit to ensure its economic feasibility in deep peak-shaving working conditions.

Key words: combined cycle; hydrogen co-fring combustion; Ebsilon; thermal performance

在“碳达峰、碳中和”国家战略目标的强力驱动下，我国电力系统正加速推进能源结构低碳转型。氢能来源广泛、绿色零碳，已成为我国未来低碳能源体系的重要组成部分。近年来，我国出台众多政策法规支持鼓励氢能产业的发展，取得了较好成效[1]。燃气轮机具有及时的负荷响应能力和快速的启停能力，成为电网灵活性的有力保障。在碳减排趋势下国内外已纷纷开展燃气轮机掺氢燃烧技术研发与商业示范[2]。

国外燃气轮机掺氢研究开展较早，主要集中在GE、西门子、三菱、安萨尔多等燃气轮机制造厂商。当前阶段各厂商已达成共识，即以天然气为燃料的燃气轮机在不进行大范围改造时可以实现体积分数30%以下掺氢燃烧，当掺氢体积分数超过30%时，会面临回火、热声震荡、NO_x排放超标等问题[3-5]；为了适应更高比例掺氢燃烧甚至纯氢燃烧，燃气轮机的燃烧系统需要进行颠覆性改造[6-7]。

我国虽然在燃气掺氢领域起步较晚，但近年来自主运行及研发能力取得了巨大进步。其中，惠州大亚湾石化区综合能源站在 GE 生产的 9HA 级燃气轮机中进行了体积分数 10%的掺氢燃烧，国家电投荆门绿动能源公司在西门子生产 SGT800 燃气轮机上实现了体积分数 30%的掺氢燃烧改造[8]。2024 年，无锡明阳氢燃动力科技有限公司开发了30 MW 级纯氢燃气轮机微预混低排放燃烧技术，成功实现了整机试验点火；同时，由国家电投北京重燃能源科技发展有限公司牵头实施的国内首台兆瓦级纯氢燃气轮机成功完成整机试验验证；2025 年中国航发研制的 2 MW 级纯氢燃气轮机商业化运行取得成功，展现了自主研发技术的全面突破。

为进一步推动燃气轮机掺氢技术发展，大量的掺氢燃烧基础研究工作也在陆续开展。İlbaş 等人[9]的试验研究表明，对于甲烷/氢气混合燃料，提高掺氢比可以降低 CO 排放并提升火焰温度，但会导致NO_x排放的增加；Sagar 等人[10]研究指出，在天然气发动机中掺氢体积分数（10%~70%）提高可降低CO、CO_2和 HC 排放，但会引发 NO_x 排放的明显增长，且高掺氢比下存在爆震风险；Cappelletti 等人[11]采用新型轴向旋流器和共流喷射系统对燃烧器进行了改进，通过控制预混度和流速可实现纯氢燃料的燃烧器控制。上海电气燃气轮机有限公司开展了 F 级重型燃气轮机燃烧器天然气掺氢全压试验研究，重点考察了燃烧器在不同掺氢比下的燃烧稳定性与排放特性，验证了其自主研发的 $DeNO_x$ 燃烧器在掺氢体积分数 40%下的燃烧适应性[12-13]。

在数值模拟方面，Calabria 等人[14]对 Turbec T100P 微型燃气轮机进行了掺氢燃烧模拟，结果表明掺氢体积分数高于 15%时系统存在回火风险。Fan 等人[15]研究了氢气喷射策略对以天然气/氢气混合物为燃料的进气道中混合气形成和燃烧过程的影响。李立新等[16]发现掺氢将导致燃料着火位置提前、温度峰值提高、火焰轴向长度变短，同时外

侧值班火焰逐渐向中心混合管聚拢。耿卅捷等[17]对比了燃料体积流量恒定和热负荷恒定的情况下，掺氢对燃烧温度、NO_x、CO 和 CO_2 排放的影响规律。王珂等[18]数值研究不同空气氛围、过氧系数、产氢比例下的燃料燃烧温度、燃烧速率及主要污染物排放的过滤。李祥晟等[19]数值模拟了某 F 级重型燃气轮机掺氢体积分数为 0~100%时对燃烧室燃烧和排放性能影响。

在燃气轮机热力系统特性方面，Cormos C C[20]以三菱 M701G2 型燃气轮机联合循环为研究对象，评估了基于氢燃料联合循环发电的碳捕集与封存（CCS）方案可行性。赵乐强等[21]研究了燃气-蒸汽联合循环机组掺氢燃烧对系统热力性能以及碳减排潜力的影响。陈晓利[22]和傅腾[23]等分别利用 Aspen plus 软件建立了 PG9351FA 型及 PG9171E 型燃气-蒸汽联合循环机组热力系统模型，研究了天然气掺氢燃烧对提升机组经济性的影响。王一丰等[24]对 F 级重型燃气轮机联合循环机组掺氢发电的基础运行特性建立数学模型，预测了不同掺氢质量分数（0～20%）下机组的效率、功率和燃气温度以及 CO_2 排放。

根据上述研究现状分析可知，当前燃气轮机掺氢的燃烧技术已取得显著突破，纯氢燃气轮机的商业应用指日可待。然而掺氢对燃气轮机机组热力系统性能影响的研究还偏少，且现有研究主要集中在纯凝机组上。随着国家部委对机组供热改造的大力提倡，抽凝式燃气轮机联合循环机组应用越来越普及。当前掺氢燃烧对抽凝式燃气轮机联合循环机组热力性能影响的研究还不够深入，特别是关于燃气轮机掺氢燃烧与双压无再热余热锅炉之间的相互影响研究更为少见。因此，本文针对小 F 级 SGT800 燃气轮机联合循环抽凝机组构建热力系统仿真模型，旨在对不同掺氢质量比及不同负荷条件下机组的热力性能进行定量对比分析，为机组掺氢运行特性提供理论参考依据。

1 理论基础与系统模型

1.1 联合循环系统热力学模型

燃气-蒸汽联合循环是一种高效的热力发电系统，其核心思想是实现能量的梯级利用。本研究基于公司小 F 级 SGT800 联合循环机组的实际热力系统，采用 Ebsilon 热力系统仿真平台构建了包含燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机三大核心部件的仿真模型（图 1）。为确保模型的准确性与可信度，本研究基于电厂热平衡图对模型进行了搭建与简化。具体而言，模型构建过程中考虑了工质物性假设、节点压力损失设定等模型边界条件，并对额定供热 100%负荷工况进行仿真计算。将仿真得到的机组主要热力性能参数与设计参数进行对比，结果如表 1 所示。由表 1 可以看出，两者的相对误差均在 5%以内，满足工程应用要求。

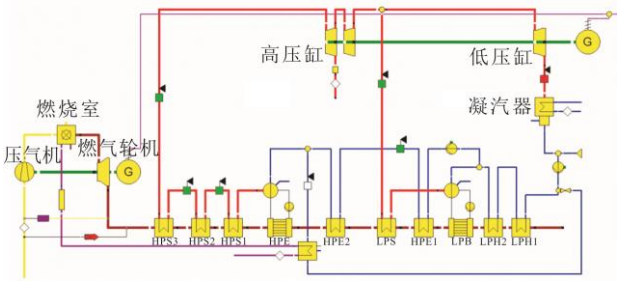


图 1 燃气-蒸汽联合循环机组 Ebsilon 模型

Fig.1 Ebsilon model of the gas-steam combined cycle unit

表 1 100%负荷下联合循环机组主要性能参数计算值与设计值比较

Tab.1 The calculated and design values of main performance parameters of the combined cycle unit at 100% load

参数	设计值	模拟值	相对误差/%
供热出力/kW	44 230.00	43 525.37	–1.59
燃气轮机功率/kW	54 063	54 057	–0.01
汽轮机功率/kW	10 843	10 913	0.65
总电功率/kW	64 906	64 970	0.10
燃气轮机热耗率/(kJ (kW h)$^{-1}$)	9 080.80	9 073.18	–0.08
电热耗率/(kJ (kW h)$^{-1}$)	7 563.80	7 549.16	–0.19
总热耗率/(kJ (kW h)$^{-1}$)	4 498.40	4 520.64	0.49
燃气轮机效率/%	39.64	39.68	0.09
电效率/%	47.60	47.69	0.18
联合循环效率/%	80.03	79.63	–0.49
热电比/%	68.15	66.99	–1.70

1.1.1 燃气轮机模型

燃气轮机模型主要包括压气机、燃烧室和燃机透平三部分。其中压气机为 15 级轴流式压气机，其压比为 20。空气经过压气机多级加压后与喷入的燃料在燃烧室混合并点燃，产生高温、高压的燃气。这些高温高压燃气膨胀，推动燃机透平叶片高速旋转，将燃料的化学能直接转化为机械能。透平的旋转动力一部分通过传动轴传递给压气机，以维持空气的持续压缩，另一部分则用于驱动发电机或其他机械设备。膨胀后的燃气仍含有大量余热，将其引入余热锅炉产生蒸汽，驱动蒸汽轮机发电或对外供热，从而提高联合循环能源利用效率。

1.1.2 余热锅炉模型

余热锅炉为东方菱日锅炉有限公司生产的双压、卧式、自然循环、无补燃余热锅炉。来自凝汽器的冷凝水经过低压加热器后进入低压汽包，一路通过下降管进入低压蒸发器吸收热量产生低压饱和蒸汽，低压饱和蒸汽进入低压过热器，被中温烟气加热成低压过热蒸汽；另一路经给水泵进入高压省煤器加热。从高压省煤器出来的高压给水（接近饱和温度）进入高压汽包，然后通过下降管进入高压蒸发器吸收热量，产生高压饱和蒸汽，高压饱和蒸汽进入高压过热器被高温烟气加热成高压过热蒸汽，直接送往蒸汽轮机的高压缸做功，低压过热蒸汽以补汽形式进入汽轮机低压缸做功。

1.1.3 蒸汽轮机模型

汽轮机为杭州中能汽轮动力有限公司生产的高压、双压、无再热、抽凝、单缸型汽轮机，型号为 C23-7.8/1.3。在构成的联合循环中，做功工质以过热蒸汽的形式自余热锅炉进入汽轮机中膨胀后推动汽轮机转子进行做功输出，低压缸乏气排入凝汽器中。

1.2 联合循环性能评价指标

燃气−蒸汽联合循环性能评价指标[25-26]如下。

机组总热耗量：

$$Q_{\text{fuel}} = m_{\text{fuel}} \times Q_{\text{LHV}} \tag{1}$$

燃气轮机系统效率：

$$\eta_{\text{gt}} = \frac{W_{\text{gt}}}{Q_{\text{fuel}}} \tag{2}$$

联合循环机组效率：

$$\eta_{\text{cc}} = \frac{W_{\text{cc}}}{Q_{\text{fuel}}} \tag{3}$$

$$W_{\text{cc}} = W_{\text{gt}} + W_{\text{st}} \tag{4}$$

式中：m_{fuel} 为燃料质量流量，kg/s；Q_{LHV} 为燃料高位热值，kJ/kg；W_{st} 为蒸汽轮机出功，MW；W_{gt} 为燃气轮机出功，MW；W_{cc} 为联合循环系统出功，MW。

1.3 燃料掺混方案与运行策略

为系统评估掺氢燃烧对联合循环机组性能的影响，考虑了燃料掺混方案与系统运行策略 2 个研究角度。所有工况均遵循总输入燃料热量恒定的原则，以确保性能对比的公平性与一致性。

1）燃料掺混方案

本研究采用质量掺混方案来定义氢气与天然气的混合比例，即氢气（H_2）的质量流量占总燃料质量流量的百分比（α_{H_2}），计算公式为：

$$\alpha_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{m_{\text{NG}} + m_{H_2}} \tag{5}$$

为确保不同掺混工况下具有可比的能量输入基准，本研究设定所有工况的总输入燃料低位热值保持不变，即：

$$Q_{\text{fuel,LHV}} = m_{\text{NG}} \times Q_{\text{LHV},NG} + m_{H_2} \times Q_{\text{LHV},H_2} \tag{6}$$

在此原则下，随着掺混比例 α_{H_2} 的增加，由于氢气的热值远高于天然气，为维持总热量恒定，系统的总燃料质量流量将相应减少。这更真实地反映了在固定能量需求下，用高热值燃料替换低热值燃料的工程场景。

2）联合循环系统运行策略

为确保燃气轮机热端部件的安全并维持循环效率评估的基准，本研究将透平入口燃气温度（turbine inlet temperature，TIT）作为首要控制目标，并将其严格恒定于设计值。该目标的实现依赖于燃料控制与空气控制的协同机制：首先，控制系统根据掺混比例的变化调节总燃料流量，以严格遵循总输入热量恒定的基本原则；随后，压气机进口可调导叶的开度随之调整，以精确匹配所需的空气流量。通过这种闭环协同调节，最终确保透平入口燃气温度在各种掺氢工况下均能高度稳定在目标值，维持系统运行的可靠性与效率。

2 燃料掺氢对联合循环系统热力性能影响分析

2.1 基准工况分析：掺氢比对系统热力性能的演化规律

对于联合循环系统而言，其源动力来自输入燃

料，燃料本身能提供的能量决定了联合循环系统的做功能力。燃料掺混前的主要成分为甲烷，摩尔分数占比达到 94.3%，燃料单位热值为 47 175 kJ/kg。当向其中掺混氢气时，燃料组分发生改变。不同掺氢比（质量比，下同）下燃料质量流量和燃料单位热值如图 2 所示。由于氢气质量热值（119 986 kJ/kg）显著高于天然气，混合燃料的整体单位热值随掺氢比的提高而单调递增。根据能量守恒定律，在维持系统总输入热量恒定的条件下，燃料单位热值的提升必然导致其质量流量的相应下降。

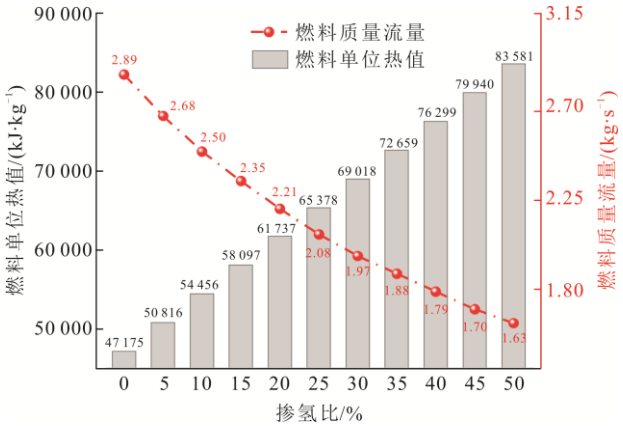


图 2 不同掺氢比下的燃料质量流量和燃料单位热值
Fig.2 The mass flow rates and calorific values per unit of the fuel with different hydrogen blending ratios

图 3 为不同掺氢比下的过量空气系数。由图 3 可见，过量空气系数随掺氢比增加而显著下降。当掺氢比达到 50%时，过量空气系数从纯天然气工况下的 3.60 锐减至约 1.28，降幅超过 60%，这是氢气燃烧产物热物性改变所带来的直接效益。

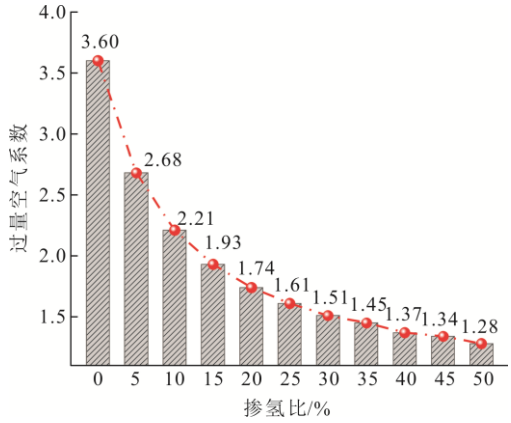


图 3 不同掺氢比下的过量空气系数
Fig.3 The excess air ratios at different hydrogen blending ratios

氢气燃烧产物主要是 H_2O，其比热容高于天然气燃烧产物中的 CO_2。更高的比热容意味着单位质量的烟气可以带走更多的热量，冷却效率更高。因此，系统不再需要像燃烧纯天然气时那么多的过量空气来进行冷却，就能将燃气温度有效控制在入口燃气温度以下。这是燃气轮机控制系统为了在燃料特性改变后依然能维持核心安全参数透平入口燃气温度恒定，而主动调整空气流量的结果。

不同掺氢比下的透平排烟流量和透平排烟温度的变化如图 4 所示。在整个掺氢比变化范围内，透平排烟温度表现出高度的鲁棒性，其数值稳定在 570~580 ℃之间。这得益于控制系统对透平入口温度的精确闭环控制，从而确保了透平热力过程的稳定性。值得注意的是，尽管排烟温度保持稳定，但这背后是控制系统为抵消烟气热物性恶化对透平做功效率的负面影响而进行的主动调节。这种效率的隐性衰减，将在后续的功率输出中显现出来。

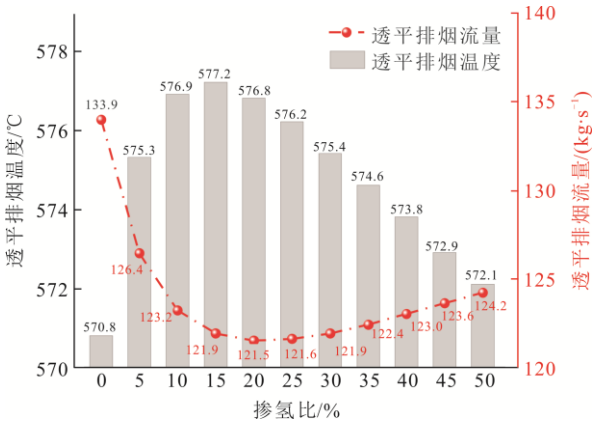


图 4 不同掺氢比下的透平排烟流量和透平排烟温度
Fig.4 The turbine exhaust gas flow rates and temperatures at different hydrogen blending ratios

排烟流量的变化呈现出的“U 型”曲线，这是过量空气系数快速下降的直接体现。在掺氢初期，烟气冷却效率的改善最为明显，因此控制系统可以削减过量空气，导致总流量急剧减少。当接近燃烧稳定和冷却需求的下限时，控制系统不再继续削减空气流量。此后，为了匹配持续减少的燃料流量并维持稳定的燃烧，控制系统会动态地略微增加空气供给，使得排烟流量在谷底后出现小幅回升，以确保燃烧过程始终处于安全区内。

排烟流量与温度的上述变化规律，共同决定了透平排烟热量的演化趋势。不同掺氢比下的透平/余热锅炉排烟热量如图 5 所示。由于排烟温度基本恒定，排烟热量的变化趋势与排烟流量高度同步，同样呈现出“先快速下降，到达谷底后略

有回升”的特征。在掺氢初期，排烟流量的锐减直接导致了排烟热量的显著降低，标志着可供余热锅炉回收的能量大幅收缩。进入掺氢中后期，随着排烟流量的回升，排烟热量也同步增加。

由图 5 还可看出，在低掺氢比例下，余热锅炉输入热量的锐减。这直接导致了发电功率与排烟损失的同步收缩。随着掺氢比的提升，系统输入的总能量（燃料化学能+空气显热）虽略有回升，但用于发电的有效能量份额却明显减少，同时排烟废热也在增加，这说明余热锅炉将热能转化为蒸汽烟的整体效率在持续下降。

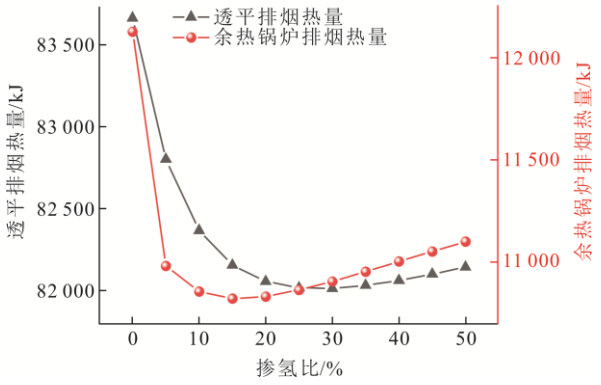


图 5 不同掺氢比下的透平/余热锅炉排烟热量

Fig.5 The exhaust heats of turbine/waste heat boiler at different hydrogen blending ratios

图 6 展示了不同掺氢比下燃气轮机功率与蒸汽轮机功率的构成及其对联合循环总功率的贡献。由图 6 可见，联合循环总功率随掺氢比增加呈现先增后降的“倒 U 型”特征，峰值出现在约 20%~30%的掺氢区间。

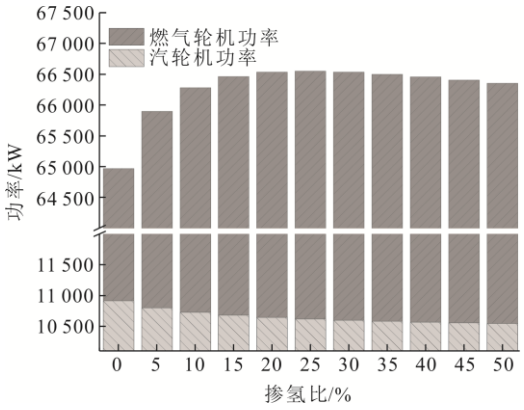


图 6 不同掺氢比下的燃气轮机功率与蒸汽轮机功率

Fig.6 The gas turbine power and steam turbine power at different hydrogen blending ratios

在掺氢初期，过量空气系数大幅削减，压气机耗功急剧下降，其收益远超烟气热物性恶化带来的损失，因此燃气轮机功率显著上升。后期，压气机耗功下降空间耗尽，而烟气热物性恶化（比热容升高，分子量降低）导致的透平做功效率下降成为主导因素，燃气轮机功率随之缓慢回落。蒸汽轮机功率的持续下降，是一个在恒定供热的刚性约束下，由烟源降级和内部换热效率恶化共同导致的、不可逆的性能衰减过程。

图 7 展示了不同掺氢比下的高/低压蒸汽流量变化趋势。由图 7 可见，随着掺氢比提高，高品位、高价值的发电主力蒸汽持续减少，而其份额被低品位的辅助蒸汽和最终排弃的废热所侵占，这是一种能量品位的“劣化”。

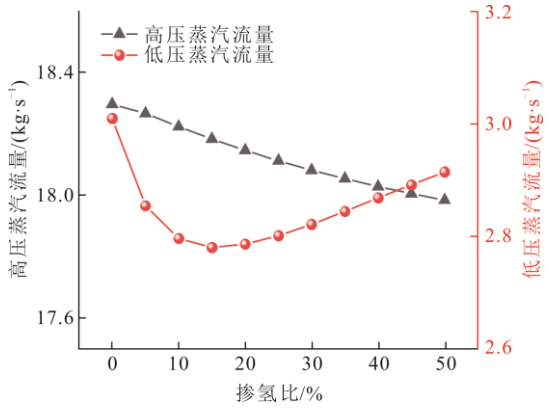


图 7 不同掺氢比下的高/低压蒸汽流量

Fig.7 The high/low-pressure steam flow rates at different hydrogen blending ratios

图 8 给出了不同掺氢比下的联合循环效率以及燃气轮机发电效率势。从效率角度看，在整个掺氢过程中，燃气轮机效率与联合循环效率均实现了显著提升。燃气轮机效率峰值达到 41.05%（增幅 1.37%），联合循环效率峰值达到 80.79%（增幅 1.15%），相较于纯天然气工况，系统的热力学性能得到了明显优化。

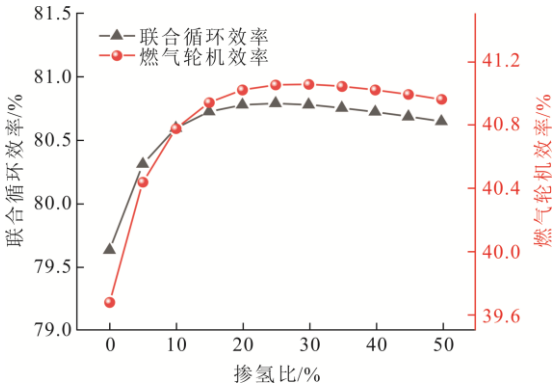


图 8 不同掺氢比下的联合循环效率和燃气轮机效率

Fig.8 The efficiencies of the combined cycle and gas turbine at different hydrogen blending ratios

2.2 变工况特性：掺氢比对系统热力性能影响的负荷依赖性

在灵活性需求下，联合循环机组须承担调峰任务，因此研究机组变负荷下的掺氢性能具有重要现实意义。值得注意的是，当前机组在低负荷下难以满足 53 t/h 的抽汽供热量，因此假设变负荷下机组的热电比为恒定值，即 0.669 9。图 9 展示了不同燃气轮机负荷下燃料质量流量随掺氢比变化的曲线。由图 9 可见，不同负荷下燃料总流量都随着掺氢比的提高而减小，且燃料流量的减小幅度随着负荷的下降而逐渐变缓。

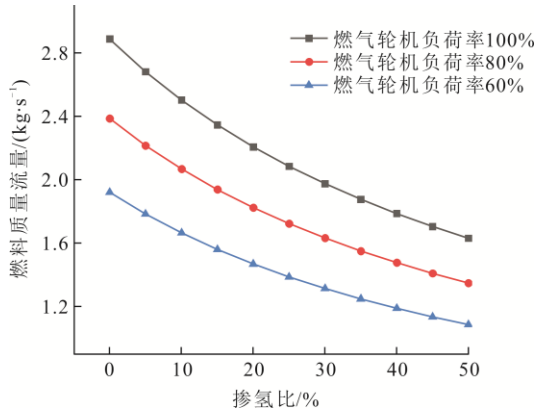


图 9 不同负荷率下燃料质量流量与掺氢比变化
Fig.9 Variations of the fuel mass flow rate and hydrogen blending ratio at different load rates

图 10 和图 11 分别给出了不同燃气轮机负荷率下掺氢比对透平排烟热量和余热锅炉的排烟热量的影响。由图 10 和图 11 可见，不同燃气轮机负荷率下的透平排烟热量和余热锅炉的排烟热量均随着掺氢比的增加呈现出先快速下降，后趋于平稳，最终缓慢回升的“U 型”趋势。

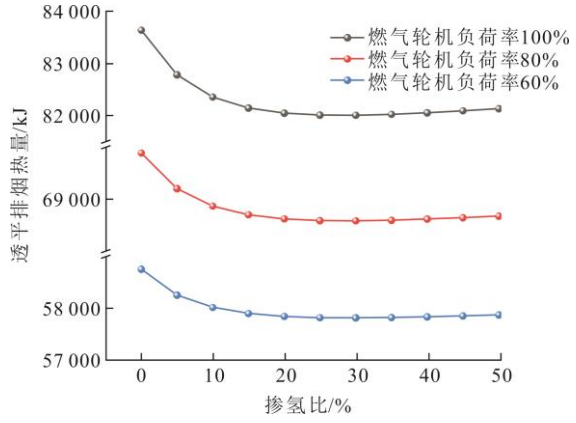


图 10 不同负荷率下掺氢比对透平排烟热量的影响
Fig.10 Effect of hydrogen blending on turbine exhaust gas heat at different load rates

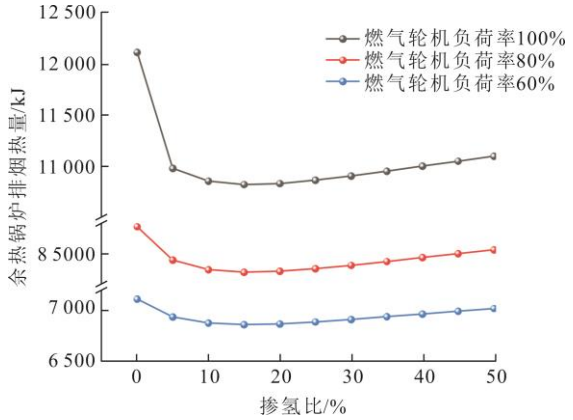


图 11 不同负荷率下掺氢比对余热锅炉排烟热量的影响
Fig.11 Effect of hydrogen blending on exhaust gas heat of the HRSG at different load rates

图 12 和图 13 分别给出了不同燃气轮机负荷率下燃气轮机效率与联合循环效率随掺氢比的变化曲线。分析表明，掺氢对机组性能的影响呈现一种复杂的、具有双重维度的负荷依赖性。

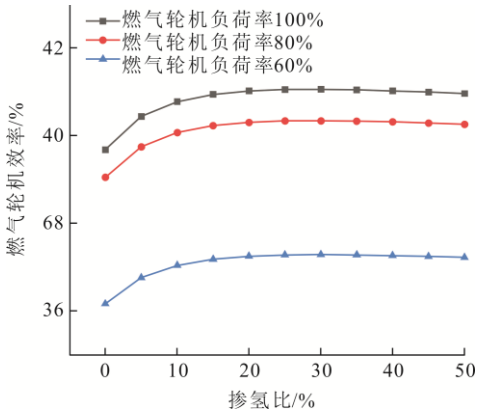


图 12 不同负荷率下掺氢比对燃气轮机效率的影响
Fig.12 Effect of hydrogen blending on gas turbine efficiency at different load rates

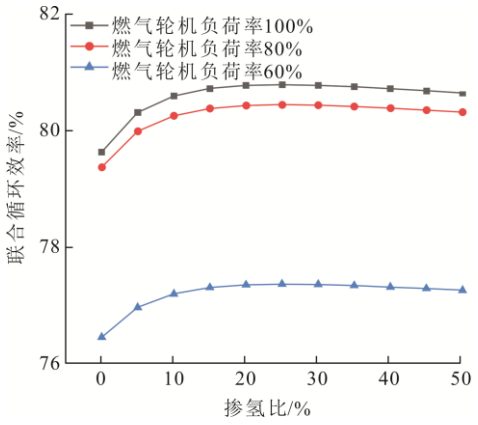


图 13 不同负荷率下掺氢比对联合循环效率的影响
Fig.13 Effect of hydrogen blending on combined cycle efficiency at different loads

由图 12 和图 13 可见，在高负荷区，掺氢通过优化燃烧过程，最大化机组的绝对效率增益。随着掺氢比从 0 增加到 50%，在燃气轮机负荷率 100%、80%和 60%工况下，燃气轮机效率的峰值分别提升了 1.38%、1.28%和 1.12%，联合循环效率的峰值也分别提升了 1.16%、1.08%和 0.92%。这组数据清晰地表明，机组在高负荷运行时，掺氢带来的性能增益绝对值最大。这是因为高负荷工况下燃料流量和能量基数更大，掺氢带来的压气机耗功减少等正面效应，在更大的能量尺度上被放大，从而转化为更可观的效率提升。

在低负荷区，掺氢提升了机组的性能底线，保障其在深度调峰工况下的经济可行性。所有燃气轮机在进入深度调峰区间时，都面临着性能“断崖式”衰减的共同挑战。而掺氢的核心价值，并非改变这一衰减规律，而是将整个性能平台向上平移，从而抬高机组的“生存底线”。具体而言，即便在效率最低的 60%燃气轮机负荷率工况下，掺氢依然能提升 1.12%燃气轮机效率和 0.92%联合循环效率。它确保了机组在承担深度调峰这一最严苛的任务时，仍能维持一个相对可接受的经济运行水平，从而为电网提供关键的灵活性。

3 结　论

本文基于 Ebsilon 仿真平台搭建了小 F 级 SGT800 燃气−蒸汽联合循环抽凝机组热力系统模型，在维持总输入燃料热量与透平入口燃气温度恒定的条件下，系统探究了氢气掺混质量比（0~50%）与机组负荷率（60%~100%）双重因素对系统热力性能的影响规律，主要结论如下。

1）在 100%燃气轮机负荷率及最大抽凝工况下，随着掺氢比的提高，燃料质量流量和空气过量系数逐渐减小，燃气轮机效率以及联合循环效率逐渐提高。当掺氢比从 0 提高至 50%时，燃气轮机效率峰值达到 41.05%（增幅 1.38%），联合循环效率峰值达到 80.79%（增幅 1.16%）。

2）在高负荷区，掺氢通过优化燃烧过程，最大化机组的绝对效率增益。在燃气轮机负荷率 100%、80%和 60%工况下，掺氢使得燃气轮机效率的峰值分别提升了 1.38%、1.28%和 1.12%，联合循环效率的峰值也分别提升了 1.16%、1.08%和 0.92%。在低负荷区，掺氢抬升机组的性能底线，保障其在深度调峰工况下的经济可行性。

［参 考 文 献］

［1］ 何青, 孟照鑫, 沈轶, 等. “双碳”目标下我国氢能政策分析与思考[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 27.
He Q, Meng Z X, Shen Y, et al. Analysis and thinking of hydrogen energy policies in China under “double carbon” target[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 27.

［2］ 张燕京, 许超, 王更阳, 等. 氢燃料燃气轮机研究现状及技术进展[J]. 分布式能源, 2025, 10(5): 10.
Zhang Y J, Xu C, Wang G Y, et al. Development status and technical progress of hydrogen-fueled gas turbines[J]. Distributed Energy, 2025, 10(5): 10.

［3］ Zhou H Q, Xue J Y, Gao H B, et al. Hydrogen-fueled gas turbines in future energy system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 64: 569.

［4］ 李苏辉, 张归华, 吴玉新. 面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1423.
Li S H, Zhang G H, Wu Y X. Advanced combustion technologies for future gas turbines[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology Edition), 2021, 61(12): 1423.

［5］ Shchepakina E A, Zubrilin I A, Kuznetsov A Y, et al. Physical and chemical features of hydrogen combustion and their influence on the characteristics of gas turbine combustion chambers[J]. Applied Science, 2023, 13(6): 3754.

［6］ 李小龙, 洪小飞, 陈宇卿. 燃气轮机掺氢燃烧技术[J]. 南方能源建设, 2023, 10(6): 14.
Li X L, Hong X F, Chen Y Q. Hydrogen-blended combustion technology in gas turbine[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(6): 14.

［7］ Gaurav S, Schreiner B D J, Sun X X, et al. A review of hydrogen micromix combustion technologies for gas turbine applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 127: 295.

［8］ 李立新, 张昭昭. 某型号 F 级燃气轮机混氢燃烧的性能分析和工程实践[J]. 动力工程学报, 2022, 42(10): 912.
Li L X, Zhang Z Z. Combustion performance analysis and engineering practice of a F-class gas turbine with hydrogen addition[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(10): 912.

［9］ İlbaş M, Yilmaz İ. Experimental analysis of the effects of hydrogen addition on methane combustion[J]. International Journal of Energy Research, 2012, 36(5): 643.

［10］ Sagar S M V, Agarwal A K. Knocking behavior and emission characteristics of a port fuel injected hydrogen enriched compressed natural gas fueled spark ignition engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 42.

［11］ Cappelletti A, Martelli F. Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(15): 10513.

［12］ 崔耀欣, 刘晓佩, 陈明敏. F 级重型燃气轮机燃烧器天然气掺氢全压试验研究[J]. 燃气轮机技术, 2021, 34(2): 38.
Cui Y X, Liu X P, Chen M M. Experimental study of natural gas mixed with hydrogen under full pressure of f-class heavy duty gas turbine burner[J]. Gas Turbine Technology, 2021, 34(2): 38.

［13］ 何磊, 张富诚, 颜伟, 等. F 级重型燃气轮机新型 $DeNO_x$ 燃烧器掺氢燃烧试验研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(9): 1370.
He L, Zhang F C, Yan W, et al. Experimental study on

hydrogen-blended natural gas combustion of a new DeNO$_x$ burner for F-class heavy-duty gas turbine[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(9): 1370.

[14] Calabria R, Chiariello F, Massoli P, et al. CFD analysis of Turbec T100 combustor at part load by varying fuels[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2015, 56796: V008T23A020.

[15] Fan B, Zhang Y, Pan J, et al. The influence of hydrogen injection strategy on mixture formation and combustion process in a port injection (PI) rotary engine fueled with natural gas/hydrogen blends[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 173: 527.

[16] 李立新, 刘星雨, 曾过房, 等. SGT-800 重型燃气轮机天然气掺氢燃烧数值模拟研究[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 70.
Li Li X, Liu X Y, Zeng G F, et al. Numerical modeling of natural gas combustion with hydrogen blending in SGT-800 heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 70.

[17] 耿卅捷, 潘禾吉田, 杨欢, 等. 燃气轮机天然气掺氢燃烧及排放特性数值模拟研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 1.
Geng S J, PAN H J T, Yang H, et al. Numerical study on influence of H_2 blending on combustion and emission characteristics of gas turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 1.

[18] 王珂, 张引弟, 王城景, 等. CH_4 掺混 H_2 的燃烧数值模拟及掺混比合理性分析[J]. 过程工程学报, 2021, 21(2): 240.
Wang K, Zhang Y D, Wang C J, et al. Numerical simulation of combustion of CH_4 mixed H_2 and rationality analysis of premixed ratio[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(2): 240.

[19] 李祥晟, 郭菡, 郁鸿飞, 等. 掺氢对燃气轮机燃烧室燃烧和排放性能的影响研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 9.
Li X C, Guo H, Yu H F, et al. Study on combustion and emission performance of hydrogen fuel gas turbine combustor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 9.

[20] Cormos C C. Evaluation of power generation schemes based on hydrogen-fuelled combined cycle with carbon capture and storage (CCS)[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(5): 3726.

[21] 赵乐强, 赵连东, 刘柏毅. 掺烧绿氢对联合循环发电系统热力性能影响研究[J]. 吉林电力, 2024, 52(4): 10.
Zhao L Q, Zhao L D, Liu B Y, et al. Research on influence of co-firing green hydrogen on thermal performance of combined cycle power generation systems[J]. Jilin Electric Power, 2024, 52(4): 10.

[22] 陈晓利, 陈希叶, 邱朋华, 等. 添加 H_2 对 9F 级燃气-蒸汽联合循环机组效率的影响[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 12.
Chen X L, Chen X Y, Qiu P H, et al. Effect of hydrogen addition on the efficiency of 9F class gas-steam combined cycle unit[J]. Journal of Thermal Science, 2022, 37(9): 12.

[23] 傅腾, 陈晓利, 陈希叶, 等. 氢气对 PG9171E 型燃气-蒸汽联合循环系统性能的影响[J]. 节能技术, 2022, 40(2): 105.
Fu T, Chen X L, Chen X Y, et al. Effect of hydrogen on performance of PG9171E gas-steam combined cycle[J]. Energy Conservation Technology, 2022, 40(2): 105.

[24] 王一丰, 肖俊峰, 胡孟起, 等. 重型燃气轮机联合循环机组掺氢燃烧发电模型及变负荷研究[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 129.
Wang Y F, Xiao J F, Hu M Q, et al. Modeling and load-following analysis of hydrogen fueled power generation of heavy-duty gas turbine combined cycle unit[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 129.

[25] 张天舒, 安浩东, 张埔, 等. 燃气-蒸汽联合循环机组热力性能仿真建模及优化方法研究[J]. 电力设备管理, 2025(3): 221.
Zhang T S, An H D, Zhang P, et al. Research on thermal performance simulation modeling and optimization methods for gas steam combined cycle units[J]. Electric Power Equipment Management, 2025(3): 221.

[26] 薛鹏, 高四艺, 杨雨, 等. 高背压燃气轮机联合循环发电系统的集成与性能分析[J]. 热力发电, 2025, 54(11): 1.
Xue P, Gao S Y, Yang Y, et al. Integration and performance analysis of high back pressure gas turbine combined cycle power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(11): 1.

（责任编辑　杜亚勤）