

IGCC 系统空气分离集成对燃气轮机通流匹配约束影响研究

李永毅¹, 唐苓芸¹, 张磊¹, 王雨田²

(1. 华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003; 2. 国能国华(北京)燃气热电有限公司, 北京 100018)

摘要:为了探究燃气轮机在应用于 IGCC 系统时,由于空气分离(以下简称空分)集成方式与燃料热值变化引起的复杂约束问题,以某 F 级燃气轮机为基础,构建 IGCC 系统燃气轮机及空分系统性能模型,研究不同运行约束条件下空分集成方式对燃气轮机通流匹配的约束边界,确定了保持进口导叶 IGV 全开时空分整体化率和氮气回注率的可行域与燃气轮机性能的变化规律,并针对限制因素给出压气机的流量设计需求及改进后的性能对比。结果表明:保持透平进气温度稳定在设计值的情况下,可实现的最小空分整体化率为 0.15;受合成气热值及空分系统集成方式的限制,压气机与透平流量的匹配约束使低整体化率与高回注率的组合无法实现;保持透平排气温度稳定在设计值可行域的范围有所扩大;可行域内,降低空分整体化率、提高氮气回注率均有助于提升燃气轮机性能;对改型前后的燃气轮机性能进行比较,独立空分-氮气不回注组合下燃机效率提高到 35.2%;在氮气不回注与氮气完全回注时,独立空分相较于完整体化空分组合燃气轮机效率分别高 19.63% 和 15.91%。

关键词:IGCC;燃气轮机;空分集成;氮气回注;运行特性

中图分类号:TK471 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.12.021

[引用本文格式]李永毅,唐苓芸,张磊,等.IGCC 系统空气分离集成对燃气轮机通流匹配约束影响研究[J].热能动力工程,2023,38(12):182-190. LI Yong-yi, TANG Ling-yun, ZHANG Lei, et al. Study on the impact of IGCC system air separation integration on gas turbine through-flow matching constraints[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(12): 182-190.

Study on the Impact of IGCC System Air Separation Integration on Gas Turbine Through-flow Matching Constraints

LI Yong-yi¹, TANG Ling-yun¹, ZHANG Lei¹, WANG Yu-tian²

(1. College of Energy and Power Machinery Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003;
2. Guoneng Guohua(Beijing) Cogeneration Power Co., Ltd., Beijing, China, Post Code:100018)

Abstract: In order to explore the complex constraints caused by air separation integration mode and fuel calorific value change when gas turbine is applied to IGCC system, a gas turbine and air separation system performance model for IGCC system is constructed based on an F-class gas turbine. The constraint conditions of matching of air separation integration method on gas turbine through-flow matching under different operating constraints are studied, the feasible domain of air separation integration degree and nitrogen injection rate and the variation law of gas turbine performance when keeping the inlet guide vane (IGV) fully open are determined, and the flow design requirements of the compressor and the performance comparison after improvement are given for the limiting factors. The results show that when the turbine inlet temperature is constant at the design value, the minimum air separation integration degree can

收稿日期:2023-02-27; 修订日期:2023-03-16

基金项目:国家科技重大专项(J2019-I-0009-0009);国家自然科学基金(52076079);河北省自然科学基金(E2020502013)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (J2019-I-0009-0009); National Natural Science Foundation of China (52076079); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2020502013)

作者简介:李永毅(1990-),男,华北电力大学讲师.

通讯作者:张磊(1983-),男,华北电力大学教授.

be achieved as 0.15; limited by the heat value of the syngas and the integration mode of the air separation system, the combination of low integration degree and high nitrogen injection rate cannot be realized due to the matching constraints of the compressor and turbine flow rate; keeping the turbine exhaust temperature stable at the design value, the range of the feasible domain is expanded; in the feasible domain, reducing the air separation integration degree and increasing the nitrogen injection rate are helpful to improving the gas turbine performance; by comparing the gas turbine performance before and after the modification, the gas turbine efficiency of independent air separation and nitrogen non-injection combination is improved to 35.2%; the efficiency of the independent air separation combination is 19.63% and 15.91% higher than that of gas turbine with the fully integrated air separation combination in the case of no nitrogen and nitrogen full injection, respectively.

Key words: IGCC, gas turbine, air separation integration, nitrogen injection, operating characteristics

引言

整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术是将煤气化技术与高效的燃气-蒸汽联合循环有机结合的先进动力系统,是目前最具发展前景的洁净燃煤技术之一^[1-4]。IGCC 系统中空气分离系统(ASU)耗电量占据了系统总耗电量的 50%~90%^[5]。ASU 与燃气轮机的集成方式将影响 IGCC 机组的性能,燃气轮机在应用于 IGCC 系统时面临 ASU 集成方式与燃料热值变化的复杂约束,可能出现压气机与透平流量不匹配问题,设计集成与运行不合理可能引发压气机喘振等运行故障^[6-7]。因此,探明空分系统与燃气轮机集成方式对燃气轮机部件的通流匹配和运行特性的约束机制,对于 IGCC 系统的设计选型和安全高效运行具有重要意义。

国内外学者针对空分系统整体化和不同空分技术对于 IGCC 系统的影响进行了广泛的研究。Lee 等人^[8]的研究指出 IGCC 系统功率随空分整体化率的减小而增加,在 20%~40% 的最佳空气抽出比例范围内,IGCC 效率最高。Morini 与 Frey 等人^[9-10]的研究表明,与低压空分相比,高压空分与燃气轮机的集成更加紧凑,能够降低空分过程产生的功率损耗,从而提高系统效率。作为空分系统集成方式中的重要内容,氮气回注也是影响系统性能的重要因素。Lee 等人^[11]的研究发现只有空分系统在较高集成度的情况下,氮气回注系数才有条件得到提升。Han 等人^[12]的研究中考虑了高压空分与燃气轮机的一体化,发现在有无空分一体化的情况下,氮气的注入都能提高燃气轮机的输出功率。Smith 等人^[13]提出空分整体化设计中压气机抽出空气的热能用于注入氮气的加热,可实现能量再利用,从而提升机组的性能。针对非设计工况下燃气轮机的运行特性,

学者^[14-16]也进行了探究,进行了 IGCC 系统燃气轮机安全运行域及动态特性的一系列研究工作。但目前这些研究还没有形成针对不同集成方式的燃气轮机通流匹配约束及性能精确表征方法,难以针对具体集成方式提出燃气轮机的改型方案。

本文将基于 F 级重型燃气轮机,建立了燃气轮机稳态非设计特性模型,通过探究空分整体化率与氮气回注率对燃气轮机部件的流量匹配约束与运行特性的影响,确定燃气轮机应用于 IGCC 系统时可行的集成方式边界,明确在不同集成方式中由于部件通流匹配的限制对于燃气轮机的改型需求,提出典型空分集成方案下压气机的改型方案并进行性能对比,为 IGCC 系统燃气轮机的设计改进提供指导。

1 IGCC 系统

1.1 IGCC 系统模型

如图 1 所示,IGCC 系统由联合循环单元、气化及净化单元和空分单元组成。煤与来自空分单元的氧气反应,经净化单元生成净合成气,送入联合循环单元做功,带动发电机发电。其中,燃气轮机(压气机、燃烧室、透平)是动力系统的核心。

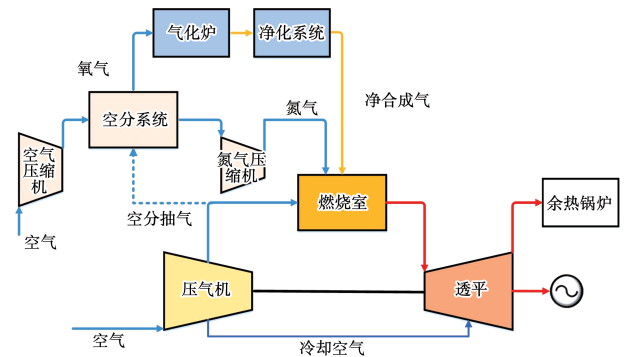


图 1 IGCC 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IGCC system

1.2 典型 F 级燃气轮机参数

选取某典型 F 级燃气轮机为研究对象,建立了燃气轮机模型,燃气轮机机组的基本参数如表 1 所示。表 2 给出了气化炉的运行参数及净化后合成气的组分与热值。

表 1 燃气轮机主要设计参数

Tab.1 Main design parameters of gas turbine

参数	数值
环境温度/K	288.15
大气压力/kPa	101.3
相对湿度/%	60
压气机级数	15
压气机压比	16.9
空气流量/kg·s ⁻¹	675
透平排气温度/K	849
透平级数	4
燃气轮机功率/MW	282.15
燃气轮机效率/%	39.55

表 2 气化炉运行参数及合成气组分

Tab.2 Gasifier operating parameters and syngas components

参数	数值
气化炉操作压力/MPa	3.55
气化炉操作温度/K	1 630
O ₂ 质量分数/%	99.5
N ₂ 体积分数/%	1.66
CO 体积分数/%	60.56
CO ₂ 体积分数/%	2.93
H ₂ O 体积分数/%	4.43
H ₂ 体积分数/%	30.19
H ₂ S 体积分数/%	0.17
CH ₄ 体积分数/%	0.06
低位发热量 LHV/kJ·kg ⁻¹	12 168.8

1.3 空分系统集成方式

空分系统的集成方式有完全整体化设计、部分整体化设计和独立设计,从主压缩机—燃气轮机压气机抽取用于空分的空气量占空分总空气量的比例称为空分整体化率 X_{ASU} :

$$X_{ASU} = \frac{G_{air,MAC}}{G_{air,MAC} + G_{air,IAC}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: G —流量, kg/s; 下标: ASU—空气分离单元; air—空气; MAC—主压缩机; IAC—独立压缩机。

$X_{ASU} = 0\%$ 表示独立空分,即空分所需空气全部来自于空分单元中的独立压缩机, $X_{ASU} = 100\%$ 表示

完全整体化空分,即空分所需空气全部来自于主压缩机, $0\% < X_{ASU} < 100\%$ 表示部分整体化空分,即空分空气量部分来自于主压缩机,部分来自独立压缩机。

氮气回注指空分系统产生的氮气回注进燃烧室。氮气回注到燃烧室的比例称为氮气回注率 (X_{N_2}):

$$X_{N_2} = \frac{G_{N_2,CC}}{G_{N_2,ASU}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: 下标: N₂—氮气; CC—燃烧室; $X_{N_2} = 0\%$ —氮气不回注; $X_{N_2} = 100\%$ —氮气完全回注。

2 燃气轮机模型

2.1 燃气轮机稳态模型

2.1.1 空分系统模型

空分系统及氮气回注设备中部分参数的设定如表 3 所示,氮气压缩机出口压力与压气机出口压力一致。将独立压缩机—空分单元中空气压缩机与氮气压缩机的功耗计入燃气轮机的功率,用于评价不同集成方式的性能。

表 3 空分系统部分设备参数假定

Tab.3 Partial equipment parameter assumptions for air separation systems

参数	数值
氮气压缩机等熵效率/%	83
空气压缩机等熵效率/%	83
氮气回注温度 ^[17] /K	573
空气压缩机出口压力 ^[18] /kPa	600.0
氮气压缩机进气压力/kPa	113.8

空分系统计算模型依据上述参数建立,其中独立压缩机与氮气压缩机的功耗计算方法如下:

$$W_{IAC} = \frac{h_{IAC,out} - h_{IAC,in}}{\eta_{IAC}} \frac{G_{ASU}}{X_{ASU}} (1 - X_{ASU}) / 1\ 000 \quad (3)$$

$$W_{NC} = \frac{h_{NC,out} - h_{NC,in}}{\eta_{NC}} X_{N_2} / 1\ 000 \quad (4)$$

式中: W —功率, MW; h —焓值, kJ/kg; η —等熵效率, %; 下标: in—入口; out—出口; NC—氮气压缩机。

2.1.2 压气机模型

压气机模型采用一维逐级叠加法构建,根据压气机各级控制方程与级通用特性曲线计算压气机各级进、出口参数并基于逐级叠加思想获得整体性能参

数。压气机通过调节进口导叶(IGV)角度来控制进口气流。假定 IGV 变化时存在如下关系^[19-20]:

$$\frac{\varphi}{\phi} = \text{定值} \quad (5)$$

式中: φ —流量系数; ϕ —压头系数。

2.1.3 燃烧室模型

燃烧室模型采用质量守恒与能量守恒构建,燃烧室质量守恒表达式如下:

$$G_{\text{air}} + G_{\text{synas}} + G_{\text{N}_2} = G_{\text{gas}} \quad (6)$$

燃烧室能量守恒表达式如下^[21]:

$$(h_{\text{gas,CCout}} - h_{\text{gas,a}})G_{\text{gas}} = (h_{\text{synas,CCin}} - h_{\text{synas,a}})G_{\text{synas}} + (h_{\text{air,CCin}} - h_{\text{air,a}})G_{\text{air}} + (h_{\text{N}_2,CCin} - h_{\text{N}_2,a})G_{\text{N}_2} + \text{LHV}\eta_{\text{cc}}G_{\text{synas}} \quad (7)$$

式中:LHV—燃料的低位发热量,取 12 168.8 kJ/kg; η_{cc} —燃烧室效率;下标:synas—合成气;gas—燃气;a—环境条件。

2.1.4 透平模型

燃气透平模型基于级特性模型构建,级特性模型基于相邻静、动叶进出口的连续性方程建立,假定静叶冷却空气参与该级做功而动叶冷却空气在级后与主燃气混合后进入下一级静叶。

$$\begin{cases} G_{1-1}^{(i)} = m_{1-1}^{(i)} A_{1-1}^{(i)} \sin \alpha_2^{(i-1)} \frac{P_{1-1}^{*(i)}}{\sqrt{T_{1-1}^{*(i)}}} q(\lambda_{c_2^{(i-1)}}) \\ G_{2-2}^{(i)} = m_{2-2}^{(i)} A_{2-2}^{(i)} \sin \alpha_1^{(i)} \frac{P_{2-2}^{*(i)}}{\sqrt{T_{2-2}^{*(i)}}} q(\lambda_{c_1^{(i)}}) \\ G_{3-3}^{(i)} = m_{3-3}^{(i)} A_{3-3}^{(i)} \sin \beta_1^{(i)} \frac{P_{\omega,3-3}^{*(i)}}{\sqrt{T_{\omega,3-3}^{*(i)}}} q(\lambda_{\omega_1^{(i)}}) \\ G_{4-4}^{(i)} = m_{4-4}^{(i)} A_{4-4}^{(i)} \sin \beta_2^{(i)} \frac{P_{\omega,4-4}^{*(i)}}{\sqrt{T_{\omega,4-4}^{*(i)}}} q(\lambda_{\omega_2^{(i)}}) \\ G_{5-5}^{(i)} = m_{5-5}^{(i)} A_{5-5}^{(i)} \sin \alpha_2^{(i)} \frac{P_{5-5}^{*(i)}}{\sqrt{T_{5-5}^{*(i)}}} q(\lambda_{c_2^{(i)}}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中: } m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (9)$$

式中: A —通流面积, m^2 ; α, β —绝对气流角、相对气流角, $^\circ$; c, w, λ —实际速度、相对速度、折合速度, m/s ; p —入口压力, kPa ; T —温度, K ; k —绝热指数; R —气体常数。

在非设计工况下,透平进口参数满足如下关系^[22]:

$$\frac{G_{T,\text{in}} \sqrt{T_{T,\text{in}}}}{mA_{T,\text{in}} p_{T,\text{in}}} = \text{定值} \quad (10)$$

式中:下标:T—透平。

2.2 燃气轮机部分负荷特性调节模型

燃气轮机部分负荷特性调节模型通过假设压气机与燃烧室的工况点参数获得透平的进口参数与冷却空气参数。通过迭代计算进行工况点的修正,计算不同空分整体化率及氮气回注率组合下的燃气轮机变工况参数。

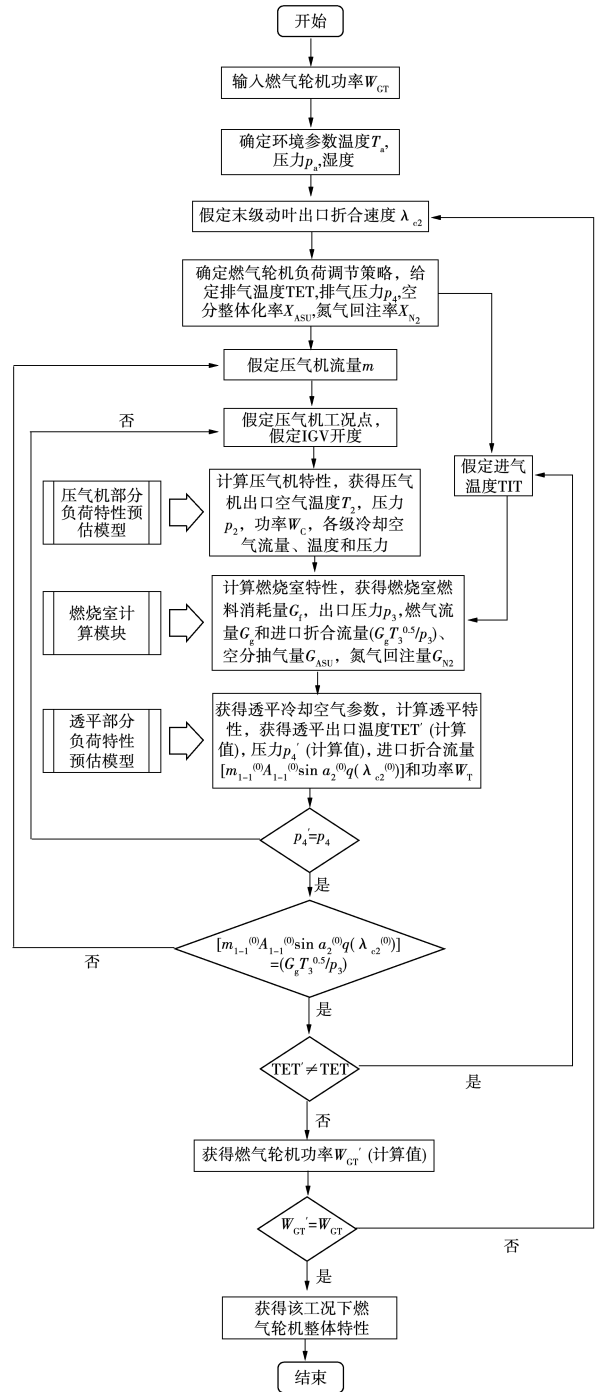


图 2 燃气轮机部分负荷特性计算步骤

Fig. 2 Steps for calculating part-load characteristics of a gas turbine

2.3 IGCC 系统燃气轮机性能评价指标

燃气轮机总功率 W_{GT} 可以用公式表示为:

$$W_{GT} = (W_T - W_{MAC}) \eta_{GEN} \quad (11)$$

式中: η_{GEN} —发电机效率, %; 下标: GT—燃气轮机。

考虑空分中独立压缩机与氮气压缩机的功耗后, 燃气轮机净功率 W_{net} 表示为:

$$W_{net} = W_{GT} - W_{IAC} - W_{NC} \quad (12)$$

燃气轮机总效率 η_{GT} 表示为:

$$\eta_{GT} = \frac{W_{GT}/1\ 000}{G_{syngas} \times LHV} \quad (13)$$

考虑空气压缩机与氮气压缩机功耗后, 燃气轮机净效率 η_{net} 表示为:

$$\eta_{net} = \frac{W_{net}/1\ 000}{G_{syngas} \times LHV} \quad (14)$$

3 结果与讨论

3.1 部件通流匹配约束及燃气轮机性能分析

合成气的热值通常只有天然气的 1/4 或更低。将以天然气为设计燃料的燃气轮机应用到 IGCC 机组时, 在相同的透平进气参数下, 合成气的流量将远大于设计的燃料流量。压气机与透平面临新的参数匹配机制, 这种情况在 IGCC 机组采用不同的空分系统集成方式(空分整体化和氮气回注)时更为突出。为研究现有机组应用于 IGCC 系统时面临的压气机与透平通流匹配问题, 利用前述的燃气轮机模型, 研究了不同运行约束条件(透平进气温度 TIT 和透平排气温度 TET 恒定)下, 空分整体化率与氮气回注率组合方式对部件通流匹配的约束规律, 确定了 IGV 全开时燃气轮机的可行域与性能的变化规律。

TIT 是制约燃气-蒸汽联合循环系统性能最重要的因素, IGCC 系统设计时应在热端部件材料和冷却性能允许的情况下尽可能提升 TIT。图 3 给出了维持透平设计进气温度(1 665 K)恒定且 IGV 全开情况下, 以空分整体化率与氮气回注率两个自由度表征的燃气轮机应用于 IGCC 系统的可行域。其中 A~F 点代表不同空分整体化率、氮气回注率下的工况点, 曲线 AB 为 IGV 全开时压气机与透平可行的匹配边界, 曲线 AB 右下方区域为 IGCC 系统内现有燃气轮机的可集成域, 曲线 AB 左上方区域的 X_{ASU} 与 X_{N_2} 组合需通过 IGV 进行空气流量调节才可满足

压气机与透平通流的匹配。受合成气热值限制, 在不进行 IGV 开度调节的情况下, 该型燃气轮机应用于 IGCC 系统时无法实现完全独立空分设计, 可实现的最小空分整体化率为 0.15(A), 此时的氮气回注率为 0; 当采用完全氮气回注时($X_{N_2} = 1$), 空分整体化率最低为 0.93(B); 从另一个角度看, 部分整体化空分设计可在一定程度上改善燃用低热值燃料时空气需求量下降的问题。

图 3 给出了可行域内保持 TIT 为设计值时不同 X_{ASU} 与 X_{N_2} 组合集成方式下燃气轮机排气温度、功率和效率率线。低空分整体化程度设计有利于提升燃气轮机的功率和效率, 但由于透平排气温度较低, 蒸汽底循环性能受到限制。较低的空分整体化率设计能够显著提升燃气轮机功率和总效率, 而较高的空分整体化率不仅不会增加燃气轮机总效率, 同时也会带来诸多负面问题, 比如对机组的启停以及运行调节的灵活性要求提高。高氮气回注系数设计有助于提升燃气轮机的功率和效率。此外, 由等功率线和等效率率线的分布规律及斜率可以发现, 空分整体化率对燃气轮机性能的影响显著高于氮气回注带来的影响。

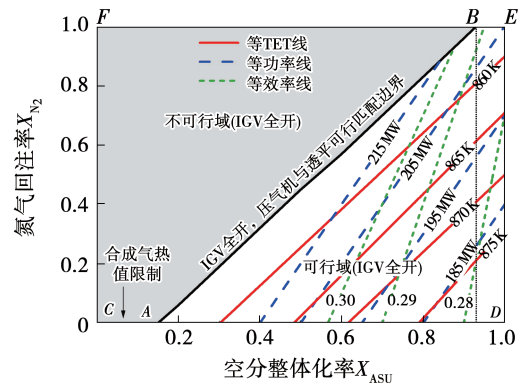


图 3 TIT 恒定(1 665 K)时燃气轮机可行域及关键参数与性能分布规律

Fig. 3 Key parameters and performance distribution law in gas turbine feasible domain at constant TIT (1 665 K)

图 4 给出了应用于 IGCC 系统时压气机(IGV 全开)与透平(TIT 恒定)的联合工况点。压气机 D 点(完全整体化、无氮气回注)的压比最低, 导致 TET 较高。此时空分抽气完全由压气机提供且无氮气回注进燃烧室, 透平流量最低。由于压气机压缩

功率远大于独立空分压缩机,且没有氮气注入增加透平的输出功率,此时燃气轮机的输出功率与效率最小。 A, B, E 点的空分整体化率与氮气回注率组合落在压气机和透平设计点附近,其他可行组合位

于 A, B, E 点与 D 点之间的特性线上,且在 IGV 全开,维持 TIT 在设计温度下时, TET 低于设计值。可行域外的组合需要调节 IGV 或者修改压气机/透平通流设计才可实现。

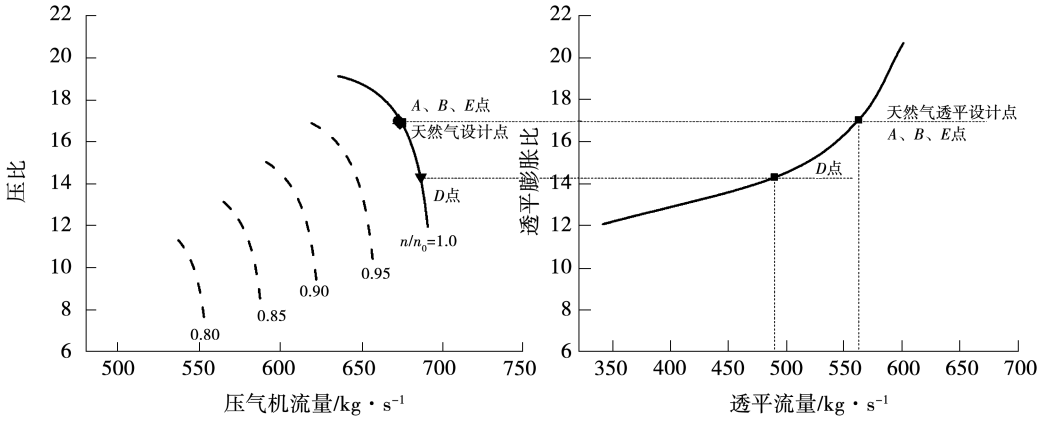


图 4 TIT 恒定(1 665 K)用于 IGCC 系统时压气机与透平联合工况点

Fig. 4 Combined compressor and turbine operating points for IGCC systems at constant TIT (1 665 K)

燃气轮机使用天然气燃料时通常通过 IGV 控制和燃料量控制以等 TET 策略运行,这种方式可以在部分负荷下保持较高的 TIT 和 TET。在环境参数为 101.3 kPa、15 °C 情况下,该型燃气轮机采用等 TET 的策略运行, TET 稳定在 849 K。而图 3 给出的 TIT 恒定时可行域内的 TET 均高于设计值,这将影响蒸汽底循环运行的安全性。为此,对采用等 TET 策略 IGV 全开的情况进行了计算分析。

IGV 全开时,受压气机与透平通流匹配的限制, AB 线左上方的低空分整体化率和高氮气回注率组合无法实现。不可行域内的空分整体化率和氮气回注率组合只能通过 IGV 调节或压气机/透平通流设计改进实现。

图 5 给出了维持透平设计 TET(849 K) 恒定且 IGV 全开情况下燃气轮机应用于 IGCC 系统的可行域。受透平排气温度限制,在不进行 IGV 开度调节的情况下,该型燃气轮机应用于 IGCC 系统时无法实现完全独立空分设计。可实现的最小空分整体化率为 0.13 (A');采用完全氮气回注时,最小空分整体化率为 0.91 (B'),相比于图 3,其可行的集成范围均略有增加。

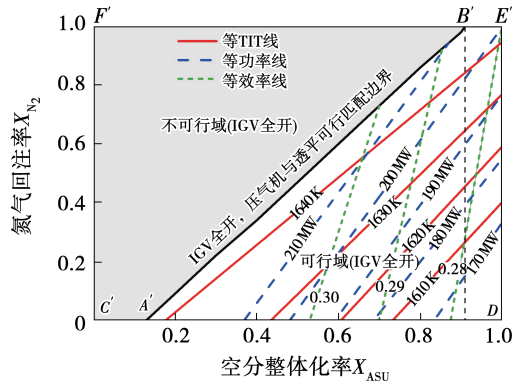


图 5 TET 恒定(849 K)时燃气轮机可行域及关键参数与性能分布规律

Fig. 5 Key parameters and performance distribution law in gas turbine feasible domain at constant TET (849 K)

图 5 给出了保持 TET 为设计值时可行域内不同 X_{ASU} 与 X_{N_2} 组合集成方式下燃气轮机进气温度、功率和效率线。在可行域内,随空分整体化率降低透平进气温度增加,燃气轮机效率、功率增加,在无氮气回注时,13% 空分整体化设计比 100% 整体化空分设计燃机效率高出约 5%。同一空分整体化率设计下,提高氮气回注率可提升系统的功率和热效

图 6 给出了应用于 IGCC 系统时压气机 (IGV 全开) 与透平 (TET 恒定) 的联合工况点,这些联合运行点能够保证底循环的安全稳定运行。由图可知,限制 TET 时 D' 点仍是压比最低点,可行域内其

他工况点均分布在 D' 点与 A', B', E' 点之间。压比限制了 TIT 的提升,从联合循环性能的角度看考虑,基于现有机组进行改型设计时可保持透平设计点不

变,通过改变压气机的设计流量,匹配压气机与透平的联合工况点, F_d, C_d, E_d, D_d 点为匹配的设计流量点。

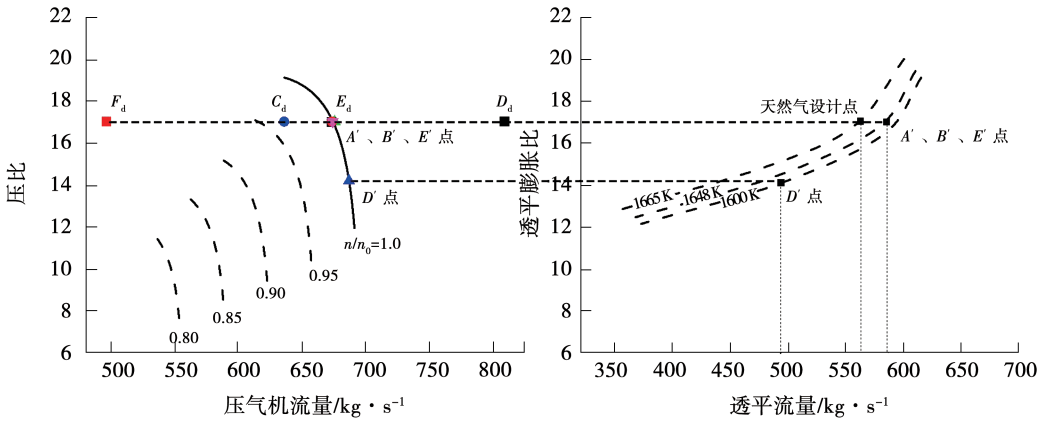


图 6 TET 恒定 (849 K) 用于 IGCC 系统时压气机与透平联合工况点

Fig. 6 Combined compressor and turbine operating points for IGCC systems at constant TET (849 K)

3.2 压气机通流能力的适应性改进及性能分析

虽然可行域内的空分整体化率与氮气回注率组合下可以实现压气机与透平的通流匹配,但仍然存在参数的不合理问题。不可行域内的组合则必须通过调整 IGV 或改进压气机/透平通流设计满足参数匹配要求。通过 IGV 开度调节可实现通流匹配,但仍存在两个问题:(1) 缩短全工况下 IGV 的可调范围,影响机组的变负荷能力与性能;(2) 受喘振裕度限制,难以达到压气机安全运行与机组性能的兼顾。基于透平的设计点对压气机通流能力进行改进设计可最大程度发挥机组的性能并保证机组的安全运行。以透平设计点为基准对典型空分整体化率和氮气回注率组合下压气机的理论设计流量进行了计算,获得了压气机流量的设计需求如表 4 所示。

IGCC 系统时的热力性能,改型后燃气轮机性能对比结果如图 7 所示。压气机设计流量改进均使燃气轮机的输出功率、效率得到提高,改型后使得 C' 点和 F' 点,在独立空分 - 氮气不回注组合下燃气轮机功率效率达到最高值 35.2%。虽然氮气回注会增加燃气轮机出力,但是在低压空分下氮气回注进燃烧室需要较大功率。因此独立空分 - 氮气完全回注的组合燃气轮机性能略低于独立空分 - 氮气不回注组合。相比于完全整体化空分组合,在氮气不回注与氮气回注完全情况下,独立空分组合燃机效率分别高出 19.63% 和 15.91%。

表 4 不同空分整体化率及氮气回注率下压气机流量需求

Tab. 4 Compressor flow demand under different air separation

integration degrees and nitrogen injection rates

压气机流量需求	$X_{ASU} = 100\%$	$X_{ASU} = 50\%$	$X_{ASU} = 0\%$
$X_{N_2} = 100\%$	675.55	585.88	496.22
$X_{N_2} = 50\%$	743.35	655.44	567.52
$X_{N_2} = 0\%$	809.06	722.45	635.84

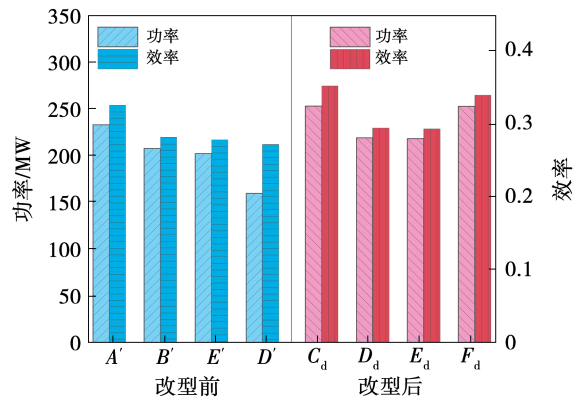


图 7 不同集成方式下燃气轮机改型前、后性能对比

Fig. 7 Comparison of gas turbine performance before and after modification under different integration modes

假定通流设计改进后压气机的设计压比、效率保持不变,计算了压气机改型后燃气轮机应用于

4 结 论

基于 F 级燃气轮机构建了考虑空分整体化的 IGCC 系统燃气轮机特性模型,比较了不同空分整体化率及氮气回注率下燃气轮机的性能,并分析了部件通流匹配对空分系统集成方式的约束规律,探索了压气机通流能力的改进方向。主要研究结论如下:

(1) 不采用 IGV 调节的情况下,基于分别确定了透平进气温度 TIT 恒定与排气温度 TET 恒定时空分整体化率组合的可行域。透平进气温度 TIT 恒定时可实现的最小空分整体化率为 0.15,透平排气温度 TET 恒定时可行域范围略为扩大,可实现的最小空分整体化率减小到 0.13。

(2) 可行域内低空分整体化设计与高氮气回注系数设计有助于提升燃气轮机的功率和效率;受压气机工况点限制,压比低于设计值,可行域内难以兼顾透平进气温度与排气温度。

(3) 以透平设计点为基准,对典型空分整体化率和氮气回注率组合下压气机的通流能力进行设计改进,并对改型后应用于 IGCC 系统的燃机热力性能对比,结果表明,独立空分-氮气不回注组合下燃气轮机效率达到最高值 35.2%,且在氮气不回注与氮气完全回注情况下,独立空分组合相较于完全整体化空分组合燃气轮机效率分别高出 19.63% 和 15.91%。

参考文献:

[1] REN S, ZHAN H, FENG X, et al. Energy evaluation of the integrated gasification combined cycle power generation systems with a carbon capture system[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147: 111208.

[2] 宋金时, 雷晓龙, 徐凯, 等. 基于 EBSILON 的燃气轮机排烟温度提升改造对联合循环发电机组性能的影响[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(11): 1-6, 43.

SONG Jin-shi, LEI Xiao-long, XU Kai, et al. Effect of EBSILON-based gas turbine exhaust gas temperature improvement on combined cycle generator unit performance[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(11): 1-6, 43.

[3] XIA C, YE B, JIANG J, et al. Prospect of near-zero-emission IGCC power plants to decarbonize coal-fired power generation in China: implications from the GreenGen project[J]. *Journal of Cleaner Pro-*

duction, 2020, 271: 122615.

[4] REN S, ZHAN H, FENG X, et al. Energy evaluation of IGCC power generation with a carbon capture system[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2020, 81: 37-42.

[5] WANG Y, QIU P, WU S, et al. Performance of an integrated gasification combined cycle system with different system integration options[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(3): 1925-1930.

[6] LISZKA M, TUKA J. Parametric study of GT and ASU integration in case of IGCC with CO₂ removal[J]. *Energy*, 2012, 45(1): 151-159.

[7] ZHANG L, HE R, WANG S, et al. A review of rotating stall in vaneless diffuser of centrifugal compressor[J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(2): 323-342.

[8] LEE C, LEE S J, YUN Y. Effect of air separation unit integration on integrated gasification combined cycle performance and NO_x emission characteristics[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2007, 24(2): 368-373.

[9] MORINI M, PINELLI M, SPINA P R, et al. Feasibility analysis of gas turbine inlet air cooling by means of liquid nitrogen evaporation for IGCC power augmentation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 168-177.

[10] FREY H C, ZHU Y. Improved system integration for integrated gasification combined cycle (IGCC) systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(5): 1693-1699.

[11] LEE J J, KIM Y S, CHA K S, et al. Influence of system integration options on the performance of an integrated gasification combined cycle power plant[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(9): 1788-1796.

[12] HAN L, DENG G Y, LI Z, et al. Integration optimisation of elevated pressure air separation unit with gas turbine in an IGCC power plant[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1525-1532.

[13] SMITH A R, KLOSEK J. A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 70(2): 115-134.

[14] HE F, LI Z, LIU P, et al. Operation window and part-load performance study of a syngas fired gas turbine[J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1): 133-141.

[15] CHACARTEGUI R, SÁNCHEZ D, MUÑOZ DE ESCALONA J M, et al. Gas and steam combined cycles for low calorific syngas fuels utilisation[J]. *Applied Energy*, 2013, 101: 81-92.

[16] 陈雷, 张忠孝, 李振中, 等. 燃气轮机变工况对 IGCC 系统性能的影响[J]. *热能动力工程*, 2009, 24(3): 313-319, 408-409.

CHEN Lei, ZHANG Zhong-xiao, LI Zhen-zhong, et al. Influence of gas turbine off-design operating conditions on the performance of

- an IGCC (integrated gasification combined cycle) system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(3):313-319,408-409.
- [17] 许世森. 整体煤气化联合循环(IGCC)发电工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- XU Shi-sen. Integrated gasification combined cycle (IGCC) power generation project [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [18] 焦树建. 论 IGCC 的空分系统[J]. 燃气轮机技术, 1998, 11(4):1-12.
- JIAO Shu-jian. Air separation system of IGCC [J]. Gas Turbine Technology, 1998, 11(4):1-12.
- [19] YANG Y, BAI Z, ZHANG G, et al. Design/off-design performance simulation and discussion for the gas turbine combined cycle with inlet air heating[J]. Energy, 2019, 178:386-399.
- [20] LI Y, ZHANG G, BAI Z, et al. Backpressure adjustable gas turbine combined cycle: A method to improve part-load efficiency [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 174:739-754.
- [21] LI Y, ZHANG G, WANG L, et al. Part-load performance analysis of a combined cycle with intermediate recuperated gas turbine [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205:112346.
- [22] KIM Y S, LEE J J, KIM T S, et al. Performance analysis of a syn-gas-fed gas turbine considering the operating limitations of its components[J]. Applied Energy, 2010, 87(5):1602-1611.
- (姜雪梅 编辑)
- (上接第 164 页)
- [6] 邓宏武, 谭艳, 王佳仁, 等. 带交错肋结构涡轮叶片复合通道的实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9):1931-1937.
- DENG Hong-wu, TAN Yan, WANG Jia-ren, et al. Experimental study on the turbine blade cooling channel with crossed-ribs[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9):1931-1937.
- [7] 刘庆东, 秦岭. 交错肋结构形式对换热和流阻特性的影响试验研究[J]. 航空发动机, 2007, 33(4):36-39.
- LIU Qing-dong, QIN ling. Experimental investigation of heat transfer and flow resistance characteristics on crossed-rib configuration [J]. Aeroengine, 2007, 33(4):36-39.
- [8] 潘婷玉. 涡轮叶片交叉肋内部冷却的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- PAN Ting-yu. Numerical study of air cooled turbine blade with crossed rib structure [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [9] 张志强. 平板交错肋冷却通道的流动换热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- ZHANG Zhi-qiang. Research on the flow and heat transfer performance of simplify crossed-rib channels [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [10] RAMIREDDY S R, GURUSIDDAPPA S P, KESAVAN V, et al. Computational study of flow and heat transfer in matrix cooling channels [C]//Proceedings of the ASME 2014 Gas Turbine India Conference, 2014: V001T04A00.
- [11] 杨子鹏. 涡轮叶片交错肋冷却通道实验及响应曲面研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- YANG Zi-peng. Experimental study on staggered ribbed cooling channel and response surface of turbine blades [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [12] 万博. 基于大涡模拟的交错肋通道流动换热特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- WAN Bo. Research on flow and heat transfer mechanism of lattice-work cooling geometry in turbine blades [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [13] 苏生, 胡捷, 刘建军, 等. 复杂空冷叶片换热特性研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(3):26-31.
- SU Sheng, HU Jie, LIU Jian-jun, et al. Calculations of heat transfer in an air-cooled blade [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(3):26-31.
- [14] 陈豪, 邓宏武, 李洋, 等. 高旋转数下 45°斜肋回转通道平均换热特性研究 [J], 推进技术, 2015, 36(9):1339-1346.
- CHEN Hao, DENG Hong-wu, LI Yang, et al. Heat transfer in rotating two-pass square duct with 45° ribbed walls under high rotation number [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(9):1339-1346.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 第三版 [M]. 高等教育出版社, 1998.
- YNAG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer (3rd edition) [M]. Higher Education Press, 1998.
- [16] HUH M, LIU Y H, HAN J C. Effect of rib spacing on heat transfer in a two-pass rectangular channel (AR = 1:4) with a sharp entrance at high rotation numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(19/20):4635-4649.
- (刘颖 编辑)