

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403045

燃气-蒸汽联合循环的碳排放绩效计算及影响分析

孙天祥¹, 刘松涛¹, 曹悦¹, 陈传敏¹, 贾文波¹, 李朋², 周卫青²

(1.华北电力大学(保定)环境科学与工程系, 河北保定 071003;

2.国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

[摘要] 为提高碳排放核算的准确性, 使企业评估碳减排效果更加直观, 提出将电厂发电量与碳排放强度相关联。首先, 基于 Aspen Plus 对燃气-蒸汽联合循环机组进行建模分析, 计算其碳排放绩效; 然后, 从机组负荷、环境温度、热网投入和天然气成分 4 个影响因素分别对碳排放绩效进行分析。结果表明, 建立的 Aspen Plus 模型能准确模拟电厂运行, 以某电厂 S106FA 多轴燃气-蒸汽联合循环机组为例, 经计算碳排放绩效为 342.66 g/(kW·h)。采用碳排放绩效对比实测法与排放因子法对碳排放进行计算, 碳排放绩效核算碳排放量更贴近实测法计算结果, 碳排放绩效法与实测法核算偏差在 0.20%。排放因子法采用实测法低位发热量和省缺值低位发热量与实测法偏差分别为 5.24% 和 19.66%; 机组负荷对联合循环机组碳排放绩效影响最为显著, 其次为热网投入、环境温度和天然气成分。为降低联合循环机组碳排放绩效, 电厂需要合理安排调峰时间和热网供热, 可以考虑使用可再生能源作为替代或补充燃料。

[关键词] 燃气-蒸汽联合循环; Aspen Plus; 模拟计算; 碳排放绩效; 影响因素

[引用本文格式] 孙天祥, 刘松涛, 曹悦, 等. 燃气-蒸汽联合循环的碳排放绩效计算及影响分析[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 114-121. SUN Tianxiang, LIU Songtao, CAO Yue, et al. Carbon emission performance calculation and impact analysis of gas-steam combined cycle[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 114-121.

Carbon emission performance calculation and impact analysis of gas-steam combined cycle

SUN Tianxiang¹, LIU Songtao¹, CAO Yue¹, CHEN Chuanmin¹, JIA Wenbo¹,
LI Peng², ZHOU Weiqing²

(1.Department of environmental Science and Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China;
2.Jibe Electric Power Research Institute, State Grid Jibe Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: To improve the accuracy of carbon emission accounting and make the effect of carbon emission reduction more intuitive, it is proposed to associate power plant generation with carbon emission intensity. Firstly, the carbon emission performance of the gas-steam combined cycle unit is calculated based on Aspen Plus. Then, the carbon emission performance is analyzed from the aspects of four influencing factors: unit load, environmental temperature, heat network input and natural gas composition. The results show that, the established Aspen Plus model can simulate the operation of the power plant accurately. Taking the S106FA multi-axis gas-steam combined cycle unit of a power plant as an example, the calculated carbon emission performance is 342.66 g/(kW·h). The carbon emission is calculated by comparing the measured method and the emission factor method. The carbon emission performance accounting is closer to the measured method, and the deviation between the carbon emission performance method and the measured method is 0.20%. The deviation between the

收稿日期: 2024-03-09

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (1400-202214404A-2-0-ZN)

Supported by: Science and Technology Project of Funding from State Grid Corporation of China (1400-202214404A-2-0-ZN)

第一作者简介: 孙天祥 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火力发电碳排放绩效评估模型, stxstx0619@163.com.

通信作者简介: 刘松涛 (1980), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为煤的清洁燃烧及污染物排放控制技术, taonyliu@163.com.

measured method and the emission factor method applying the measured low calorific value and the saved and deficient low calorific value are 5.24% and 19.66%, respectively. Unit load has the most obvious effect on carbon emission performance of the combined cycle unit, followed by heat network input, ambient temperature and natural gas composition. To reduce the carbon emission performance of the combined cycle unit, the power plant needs to arrange the peak regulation time and heat network heating reasonably, and using renewable energy as an alternative or supplementary fuel can be considered.

Key words: gas-steam combined cycle; Aspen Plus; simulation calculation; carbon emission performance; influencing factors

2020 年 9 月 22 日, 习近平总书记在第 75 届联合国大会一般性辩论中指出, CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和^[1-3]。实现碳达峰、碳中和目标, 电力行业是主战场^[4-7]。国家电网公司发布的《国家电网公司“碳达峰、碳中和”行动方案》^[8]中明确提到, 围绕“电能替代”等加强碳减排方法研究, 为产业链上下游提供碳减排服务。

碳排放核算是准确掌握我国碳排放变化趋势、有效开展各项碳减排工作、促进经济绿色转型的基本前提^[9-10]。电能替代是使用电能替代传统的能源, 可以降低整个电力系统的碳排放水平。因此, 在进行电能替代时, 需要考虑不同能源的碳排放量, 并对其进行合理的核算, 以评估电能替代对减少温室气体排放的实际影响。准确的碳排放核算能有效支撑“电能替代”碳减排效果评估。一些学者^[11-17]已经对具体燃煤机组碳排放进行相关研究。燃气电厂作为火力发电的主要方式之一, 其碳排放核算准确性非常重要。目前, 碳排放核算主要采用排放因子法, 根据活动数据等参数计算得出排放量。但是, 其存在时间尺度大, 无法结合企业实际运行情况进行测算等问题。唐小亮等^[18]分别采用排放因子法和实测法计算机组的碳排放量, 结果表明采用排放因子法计算的碳排放量大于试算配额。宋涛涛等^[19]采用排放因子法和实测法核算燃气电厂碳排放量, 因燃料实测发热量与省缺值相差, 且含碳量和碳氧化率等参数受实际工作影响变化, 致使 2 种核算方法结果产生偏差。监勇^[20]对燃气电厂温室气体排放的多种计算方法进行对比, 结果得出在线监测数据最为准确, 移动监测次之, 排放因子法最不准确。排放因子法时效性滞后, 且不能结合电厂实际情况进行计算, 实测工作开展较少, 如今需要能够结合电厂实际运行情况且准确性高的碳核算方法。

Aspen Plus 是一款标准化大型化工流程模拟软件, 现已逐渐扩展到电力行业。有学者^[21-24]基于 Aspen Plus 对联合循环机组进行模拟, 且试验证实

结果符合锅炉运行基本规律、过程机理。总体来看, 利用 Aspen Plus 对燃气-蒸汽联合循环机组进行模拟是可行可靠的方法。本文通过电厂实际运行数据, 采用 Aspen Plus 模拟燃气电厂运行, 对其碳排放绩效进行计算, 并对碳排放绩效的影响因素进行分析。本文碳排放核算方法与传统核算方法不同, 将发电量与碳排放关联, 结合电厂实际运行情况, 减少核算数据负担, 更好的帮助燃气电厂进行精确的碳排放核算以及碳减排的相关工作。

1 模型建立与碳排放绩效计算

1.1 模型建立

1.1.1 建模描述

本文以某电厂 S106FA 多轴燃气-蒸汽联合循环发电机组为研究对象, 包括一套燃气轮机、一套双压余热锅炉、一套汽轮机, 余热锅炉为双压、再热、卧式、无补燃、自然循环燃机余热锅炉。模拟主要有 4 大模块: 压气机 B1、燃气透平 B4 和汽轮机 B14 选择 Compr 模型模拟, 通过排放压力和所需功率进行定义; 燃烧室 B2 选用 RStoic 模型, 规定相关化学反应以及转化率进行定义; 余热锅炉中的高压 HSH1、2/低压 LSH1 过热器、高压 HEV1/低压 B13 蒸发器、高压 HEC1、2/低压 LEC1 省煤器均用 MHeatX 模块进行模拟, MHeatX 可用来模拟多股物流的换热过程; 高压 HP/低压 B9 汽包采用 Flash 模块模拟, 进行汽水分离。在主要单元操作模块确定后, 用流股按照实际运行工艺进行连接, 具体如图 1 所示。

1.1.2 物性选择和参数输入

Aspen Plus 提供的物性模型分为理想模型、状态方程模型、活度系数模型和特殊模型。Aspen Plus 软件提供了多种物性方法, 本文选择 PENG-POB 方法^[25-26]。

在模拟过程中, 需要输入进料流股和单元操作模块的相关参数, 具体参数来自现场运行数据, 具体见表 1。

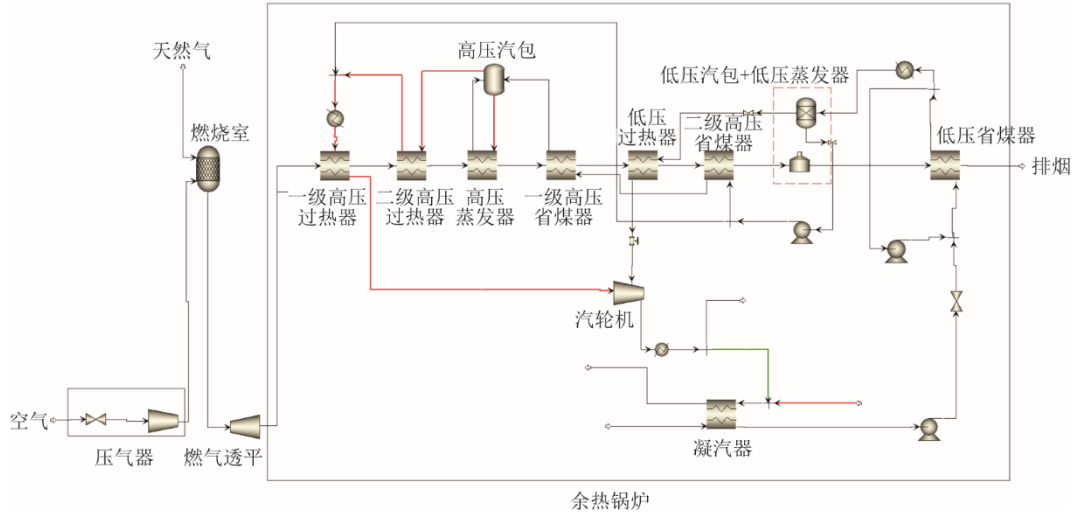


图 1 燃气-蒸汽联合循环 Aspen 流程
Fig.1 Aspen flow diagram for the gas-steam combined cycle

表 1 双压余热锅炉相关参数
Tab.1 Parameters related to double-pressure HRSG

项目	数值
空气流量/(t·h ⁻¹)	731.20
天然气流量/(t·h ⁻¹)	16.10
排气温度/℃	602.60
排烟温度/℃	89.06
高压蒸汽温度/℃	536.83
高压蒸汽压力/kPa	5 305.20
低压蒸汽温度/℃	252.69
低压蒸汽压力/kPa	550.70
给水温度/℃	23.06
给水压力/kPa	230.20

1.2 碳排放绩效计算

污染物的排放绩效就是生产单位产品所排放污染物的量^[27]。电力行业碳排放绩效是以电力产出为依据制定的电力行业污染物排放标准，即每生产 1 kW·h 电的污染物排放量。污染物排放绩效是一项能综合反映电力企业生产过程中能源利用效率和污染物排放情况的重要指标。

联合循环机组的碳排放绩效根据 Aspen Plus 模拟结果结合数学模型进行计算。

1) 天然气联合循环机组总功率

$$P_{th} = P_{tj} + P_{qj} \quad (1)$$

式中： P_{th} 为联合循环功率，kW； P_{qj} 为汽轮机功率，kW； P_{tj} 为燃气透平功率，kW。

2) 联合循环机组天然气消耗率

$$g_{th} = \frac{G_f}{P_{th}} \quad (2)$$

式中： g_{th} 为天然气消耗率，kg/(kW·h)； G_f 为天然气流量，kg/h。

3) 碳排放绩效

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i \times g_{th} \times M(CO_2) \times OF_i}{M_i} \quad (3)$$

式中： E 为碳排放绩效，g/(kW·h)； n 为天然气含烷烃种类数量； θ_i 为烷烃 i 在天然气占比，%； $M(CO_2)$ 为 CO_2 分子质量，取 44 g/mol； OF_i 为碳氧化率，%； M_i 为烷烃 i 分子质量，g/mol。

2 模型验证与计算结果

2.1 模型验证

本文模型采用燃气-蒸汽联合循环机组纯凝工况下进行模拟，其中，环境温度为 17 ℃，大气压力为 100.51 kPa，相对湿度为 80%。模拟结果与实际系统的相关参数进行对比，其中，实际系统来自于电厂数据，对比结果见表 2。

表 2 模拟结果误差分析
Tab.2 Error analysis of the simulation results

项目	实际系统	模拟系统
空气流量/(t·h ⁻¹)	731.20	731.20
天然气流量/(t·h ⁻¹)	16.10	16.10
排气温度/℃	602.60	602.60
排烟温度/℃	89.60	89.06
高压蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	114.11	114.12
高压蒸汽温度/℃	538.83	583.83
高压蒸汽压力/kPa	5 505	5 505
低压蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	15.61	15.61
低压蒸汽温度/℃	252.69	254.11
低压蒸汽压力/kPa	550.70	550.70
汽轮机输出功率/MW	37.97	37.97

由表 2 可以看出, 模拟系统的参数计算值与实际运行的设计值的误差在规定范围之内。由此可见, 该模型具有较高的准确性, 模拟结果准确。

2.2 碳排放绩效计算结果

本文根据模拟结果结合数学模型对碳排放绩效以及碳排放量进行计算, 具体结果见表 3, 天然气成分见表 4。

表 3 碳排放绩效结果
Tab.3 Carbon performance results

项目	数值
联合功率/MW	125.40
天然气消耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	130.45
碳排放绩效/(g·(kW·h) ⁻¹)	342.66
碳排放量/t	507.49

表 4 天然气成分
Tab.4 Composition of the natural gas

天然气成分	数值
甲烷 (体积分数, 下同) /%	95.949 4
乙烷/%	0.907 5
丙烷/%	0.136 7
二氧化碳/%	3.000 0
水/%	0.006 2
硫化氢/%	0.000 2
低位发热量/(MJ·m ⁻³)	34.24

本文将基于不同核算方法的碳排放量进行比较。对于实测法来说, 按照固定污染源烟气排放连续监测系统技术及检测方法的要求, 对排放源进行连续监测, 主要设备见表 5。

表 5 监测系统设备清单
Tab.5 List of equipment in the monitoring system

设备	型号
气体分析仪	ABB EL3020
预处理机柜	FT-91
采样器	HGSP-1000
VPT	VPT511NF

CO₂ 测量仪安装于垂直烟囱出口 40 m 平台处。CO₂ 测量仪监测到的数据通过数据采集模块采集后传输至主站, 由主站进行存储。燃气电厂机组碳排放量计算见式(4)。

$$E_{sc} = \frac{M(\text{CO}_2)}{22.4} \times Q \times C \times \frac{273}{273+T} \times \frac{p}{101325} \times 10^{-5} \quad (4)$$

式中: E_{sc} 为实测碳排放量, t; Q 为烟气流量, m³/h; C 为 CO₂ 体积分数, %; T 、 p 分别为测量温度与压力, °C、Pa。

其中, CO₂ 现场取样带回室内, 采用《气体中 CO、CO₂ 和碳氢化合物的测定气相色谱法》^[28] 进行分析检测, 经过计算, CO₂ 体积分数为 3.821%。基于实测法计算的机组碳排放量为 506.47 t。

对于排放因子法来说, 碳排放量根据《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》^[29] 进行计算, 具体结果见表 6。

表 6 基于排放因子法计算的碳排放量
Tab.6 Carbon emissions calculated using the emission factor method

项目	实测值	省缺值
燃气消耗量/万 m ³	28.05	28.05
低位发热量/(MJ·m ⁻³)	34.240	38.931
单位热值含碳量/(t·GJ ⁻¹)	0.015 3	0.015 3
碳氧化率/%	99	99
碳排放因子/(t·GJ ⁻¹)	0.055 5	0.055 5
碳排放量/t	533.03	606.06

由上可知, 3 种方法中, 实测法核算结果最低, 本文核算结果与实测法偏差在 0.20%, 排放因子法采用实测法低位发热量和省缺值低位发热量与实测法偏差分别为 5.24% 和 19.66%。实测法与本文核算结果产生偏差的主要原因是在运行过程中, 机组负荷发生变化, 需要分段核算并累积, 并未及时累计核算。实测法与排放因子法产生偏差的主要原因是实测法发热量与缺省值发热量相差 4.69 MJ/m³, 天然气的含碳量、碳氧化率采用的缺省值, 但其受天然气品质和实际燃烧影响, 处于变化状态。

3 碳排放绩效影响分析

碳排放绩效对于企业开展碳排放核算及后续的碳交易工作至关重要, 也反映了企业碳排放水平。因此, 本文对机组负荷、热网投入和天然气成分 3 个影响因素进行不同工况模拟, 对环境温度采用 Aspen Plus 中灵敏度分析方法, 探究并分析其对碳排放绩效的影响。

3.1 机组负荷

本文选择了 THA (满负荷)、0.8THA、0.7THA、0.5THA 和 0.3THA 5 种不同负荷下的工况进行分析。不同负荷下, 蒸汽的品质也有所不同。不同负荷下蒸汽参数见表 7, 不同负荷对碳排放绩效影响如图 2 所示。表 7 显示, 随着负荷的降低, 高压蒸汽温度略微波动, 压力则呈下降趋势, 低压蒸汽的温度和压力也在下降。蒸汽品质的降低导致了联合循环机组的功率下降。由图 2 可见, 汽轮机功率下

降最为明显,下降了 40.03%。这一变化导致了联合功率的下降,由 125.40 MW 降至 103.63 MW,因此燃料消耗和碳排放绩效也必然会增加。具体来看,天然气消耗率从 130.45g/(kW·h)升至 157.86 g/(kW·h),而碳排放绩效也从 342.66 g/(kW·h)增加至 414.66 g/(kW·h),增加了 21%。值得注意的是,汽轮机蒸汽参数虽受到机组负荷的影响,但其可调节程度相对较小。因此,对于机组负荷的变化,合理安排调峰时间至关重要。尤其在机组启动阶段,由于初始负荷较低,导致了天然气消耗率和相应的碳排放绩效较高。频繁的调峰可能会导致电厂的天然气消耗率和碳排放绩效上升,从而不利于碳减排工作的开展。

表 7 不同负荷下蒸汽参数
Tab.7 Steam parameters at different loads

	THA	0.8THA	0.7THA	0.5THA	0.3THA
高压温度/℃	536.83	538.84	538.84	538.90	538.89
高压压力/kPa	5 305.20	4 712.30	4 542.20	4 063.40	3 346.00
低压温度/℃	254.69	246.06	243.80	239.56	231.03
低压压力/kPa	600.66	478.10	455.20	417.06	334.18

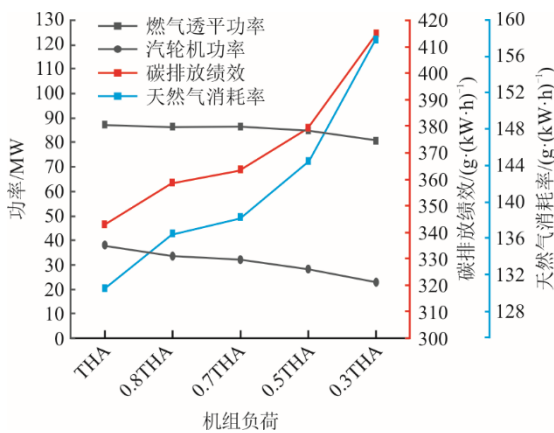


图 2 不同负荷对碳排放绩效影响
Fig.2 The effect of different loads on carbon emission performance

3.2 热网投入

本文模拟燃气-蒸汽循环联合电厂在不同抽汽量情况下的运行情况。在热电联产系统中,供热过程通常不直接产生电力,故供热碳排放通常不计入电厂的直接碳排放。因此,计算供电碳排放绩效时,应考虑热电联产总碳排放绩效与(1-供热比)的乘积。用于供热的抽汽会间接影响电厂的碳排放,部分蒸汽被送入热网,汽轮机做功能力逐渐下降。热网投入对碳排放绩效影响如图 3 所示。图 3 显示,

抽汽量越大,汽轮机的功率就越小,导致联合功率降低。联合功率由 119.9 MW 降低至 111.84 MW,降低了 7.21%。联合功率的下降会导致天然气消耗率增加,从而使热电联产总碳排放绩效呈现上升趋势,由 358.39 g/(kW·h)增至 384.22 g/(kW·h)。但是,抽汽量的增加通常会导致供热比上升。这是因为更多的抽汽意味着更多的蒸汽被用于供热,从而提高了供热比例。据《火力发电厂技术经济指标计算方法》对供热比进行计算,最小抽汽、额定抽汽和最大抽汽 3 种工况的供热比分别为 41.87%、46.16%和 48.84%。供热比的提升,使得供电分摊的碳排放绩效变小。因此可以看出,随着抽汽量的增加,供电碳排放绩效呈下降趋势,由 208.34 g/(kW·h)降至 196.57 g/(kW·h)。因此,电厂可以通过增加抽汽量,提高热电联产系统的供热比例,使系统的热效率提升。建议优化热电联产系统的设计和运行,确保最大限度地利用热能进行供热,降低能源浪费,减少碳排放。

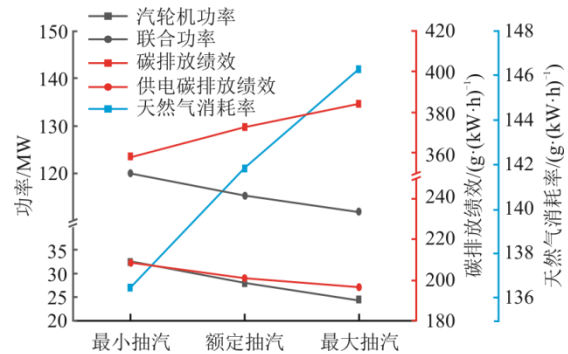


图 3 热网投入对碳排放绩效影响
Fig.3 Effect of heat network input on carbon emission performance

3.3 环境温度

本文选取环境温度为 - 10、-5、0、5、10、15、20 ℃,空气质量流量随环境温度变化而改变,采用灵敏度分析工具,插入 FORTRAN,探究环境温度对碳排放绩效的影响。当温度的变化会影响空气的比热容,温度升高,空气密度下降,相同体流量的空气,随之对应的质量流量会下降。环境温度对碳排放绩效影响如图 4 所示。图 4 显示,随着环境温度的逐渐升高,空气的质量流量由最初的 806.31 t/h 下降至 723.99 t/h,环境温度每上升 1 ℃,空气质量流量下降约 2.74 t/h。空气质量流量的下降会使燃气透平的功率降低。因为在运行过程中,燃气透平所做的功约有 2/3 是压气机消耗的,空气质量流量的下降使得压气机的功耗减小,燃气透平的

功率随之下降。燃气透平功率由 87.61 MW 下降至 84.04 MW, 下降了 4.11%, 联合功率由 125.61 MW 下降至 122.01 MW。每 kW·h 消耗的天然气也随之增加, 最后影响机组碳排放绩效, 由 335.71 g/(kW·h) 增至 345.62 g/(kW·h)。

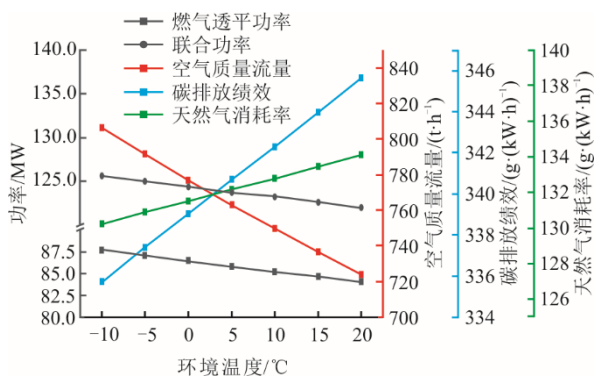


图 4 环境温度对碳排放绩效影响

Fig.4 Effect of ambient temperature on carbon emission performance

3.4 天然气成分

本文以 CH₄ 的含量为变量, 设计了 4 种工况:

1) 天然气 1, 成分为 85% (体积分数, 下同) CH₄、9% C₂H₆、6% N₂, 低位热值为 44 986.16 kJ/kg; 2) 天然气 2, 成分为 75% CH₄、9% C₂H₆、16% N₂, 低位热值为 38 008.52 kJ/kg; 3) 天然气 3, 成分为 65% CH₄、9% C₂H₆、26% N₂, 低位热值为 31 849.07 kJ/kg; 4) 天然气 4, 成分为 55% CH₄、9% C₂H₆、36% N₂, 低位热值为 26 371.88 kJ/kg。天然气有效成分 (CH₄) 比例依次递减 10%, 其低位热值依次递减。天然气成分对碳排放绩效影响如图 5 所示。由图 5 看出, 为了保证总热量, 天然气有效成分的降低会导致天然气质量流量的增加, 从 16.10 t/h 上升至 27.64 t/h。质量流量的增加会提高燃气透平的功率, 从 87.43 MW 升至 103.79 MW, 提高了 18.71%, 进而影响联合功率。但是, 天然气的有效成分比例的下降, 其低位热值也下降, 下降 41.38%。低位热值的下降趋势更明显, 使得天然气消耗率呈上升趋势, 由 130.45 g/(kW·h) 上升至 196.85 g/(kW·h)。碳排放绩效也呈上升趋势, 由 318.93 g/(kW·h) 上升至 324.49 g/(kW·h), 上升 1.74%。由此看来, 对于天然气品质的选择, 有效成分比例高的更为适宜。热值越高, 单位体积天然气燃烧后产生热能越高, 所能转化的电能越大。以此作为燃料, 达到降低天然气消耗率的目的, 更有利于降低机组碳排放绩效。但是, 基于电厂经济性

考虑, 此燃料可能在碳排放较低的同时价格较高。电厂可以考虑使用可再生能源作为替代或补充燃料。选择这些可再生能源作为燃料不仅可以降低碳排放, 还可以提高电厂的可持续性和环境友好性。

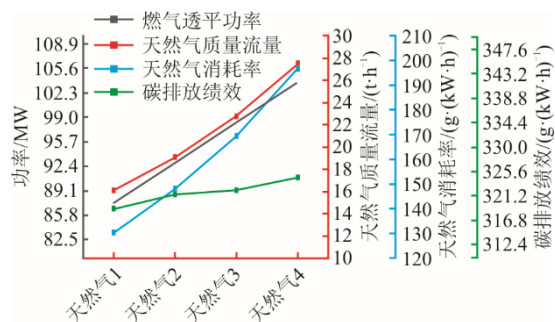


图 5 天然气成分对碳排放绩效影响

Fig.5 Effect of natural gas composition on carbon emission performance

4 结 论

1) 为了有效评估、准确计算燃气电厂碳排放, 帮助开展各项碳减排工作。本文提出一种基于 Aspen Plus 结合数学模型针对燃气电厂碳排放计算模型, 燃气-蒸汽联合循环机组进行建模和稳态模拟, 模拟结果与实际相符。

2) 经过计算, 机组纯凝状态下碳排放绩效为 342.66 g/(kW·h)。本文采用碳排放绩效对比实测法与排放因子法对碳排放进行计算, 碳排放绩效法与实测法核算偏差在 0.20%; 排放因子法采用实测法低位发热量和省缺值低位发热量与实测法偏差分别为 5.24% 和 19.66%。碳排放绩效核算碳排放量提高了燃气电厂碳排放核算的准确性与时间分辨率。

3) 通过影响因素分析, 可以看出机组负荷对碳排放绩效影响最大, 其次为热网投入、环境温度和天然气成分。为降低碳排放绩效, 电厂需要合理安排调峰时间。优化热电联产系统的设计和运行, 确保最大限度利用热能进行供热, 降低能源浪费。电厂可以考虑使用可再生能源为替代或补充燃料。降低碳排放, 提高电厂的可持续性和环境友好性。

[参考文献]

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 王攀. 中国电力行业“碳达峰, 碳中和”的发展路径研

- 究[J]. 区域治理, 2021(30): 49-50.
- WANG Pan. Research on the development path of "Carbon Peak and carbon neutral" in China's power industry[J]. Regional Governance, 2021(30): 49-50.
- [3] 喻小宝, 郑丹丹, 杨康, 等. "双碳"目标下能源电力行业的机遇与挑战[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 21-32.
- YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak[J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 12-32.
- [4] 孙杰贤. 电力"双碳"行动中的"智慧"力量[J]. 中国信息化, 2022(7): 36.
- SUN Jiexian. "Wisdom" power in the power "double carbon" action[J]. China Informatization, 2022(7): 36.
- [5] 汤亚宸, 刘婷婷, 刘广一, 等. 园区电力碳排放核算系统[J]. 供用电, 2022, 39(10): 36-43.
- TANG Yachen, LIU Tingting, LIU Guangyi, et al. Park electricity carbon emission accounting system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(10): 36-43.
- [6] 聂凡杰. 考虑绿证-碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023: 1.
- NIE Fanjie. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering green certificate trading mechanism and carbon trading mechanism[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2023: 1.
- [7] 于晓辉. 绿色供应链为电力行业低碳可持续发展注入新活力[J]. 华北电业, 2022(10): 74-75.
- YU Xiaohui. The green supply chain has injected new vitality into the low-carbon and sustainable development of the power industry[J]. North China Power, 2022(10): 74-75.
- [8] 王耀宇. 深入研讨献智慧持续向"绿"而行[J]. 华北电业, 2022(7): 28-29.
- WANG Yaoyu. In-depth discussion of wisdom to continue to "green"[J]. North China Power, 2022(7): 28-29.
- [9] 李继峰, 郭焦锋, 高世楫, 等. 国家碳排放核算工作的现状、问题及挑战[J]. 发展研究, 2020(6): 9-14.
- LI Jifeng, GUO Jiaofeng, GAO Shiji, et al. Current status, problems and challenges of national carbon emission accounting work[J]. Development Research, 2020(6): 9-14.
- [10] 张林鹏, 黄萍, 朱佳琪, 等. 交通运输行业碳排放研究进展[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(4): 76-84.
- ZHANG Linpeng, HUANG Ping, ZHU Jiaqi, et al. Research progress on carbon emissions of transportation industry[J]. Energy Research and Management, 2023, 15(4): 76-84.
- [11] 盖志杰, 王鹏辉. 燃煤电厂碳排放典型计算及分析[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 178-184.
- GAI Zhijie, WANG Penghui. A typical calculation and analysis of carbon emissions from coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 178-184.
- [12] 周盟, 熊扬恒, 周建龙. 火电厂碳排放测试平台设计研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 71-75.
- ZHOU Meng, XIONG Yangheng, ZHOU Jianlong. Design of carbon emission test platform for thermal power plant[J]. Computer Simulation, 2018, 35(3): 71-75.
- [13] 刘睿, 翟相彬. 中国燃煤电厂碳排放量计算及分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1164-1169.
- LIU Rui, ZHAI Xiangbin. Calculation of carbon emissions from China coal plants and the reduction suggestion[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1164-1169.
- [14] 高建强, 宋铜铜, 杨东江. 燃煤发电机组碳排放折算方法研究与应用[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 88-92.
- GAO Jianqiang, SONG Tongtong, YANG Dongjiang. Research and application of carbon emission conversion method for coal-fired generating units[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 88-92.
- [15] 蔡宇, 李保卫, 胡泽春, 等. 燃煤机组碳排放指标计算及影响因素分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1185-1189.
- CAI Yu, LI Baowei, HU Zechun, et al. Calculation of carbon emission index of coal-fired generating unit and analysis on influencing factors[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1185-1189.
- [16] 张小丽, 崔学勤, 王克, 等. 中国煤电锁定碳排放及其对减排目标的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(8): 31-41.
- ZHANG Xiaoli, CUI Xueqin, WANG Ke, et al. Committed CO₂ emissions of China's coal-fired power plants and their implications for mitigation target[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(8): 31-41.
- [17] 王小龙, 王强, 王小峰, 等. 燃煤电厂关键排放因子对碳排放量影响研究[J]. 山东化工, 2019, 48(23): 239-243.
- WANG Xiaolong, WANG Qiang, WANG Xiaofeng, et al. A study on the influence of key emission factors of coal-fired power plant on carbon emission[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(23): 239-243.
- [18] 唐小亮, 何川, 刘晴. 排放因子法高估燃气电厂的碳排放量——基于高邮某电厂的观测结果[J]. 电力科技与环保, 2020, 36(3): 17-20.
- TANG Xiaoliang, HE Chuan, LIU Qing. Emission factor method overestimates carbon emission of gas-fired power plant: based on observations of a power plant in Gaoyou city[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2020, 36(3): 17-20.
- [19] 宋涛涛, 倪丰平, 张琦, 等. 不同核算方法下碳排放量核算与分析[J]. 油气与新能源, 2023, 35(6): 41-46.
- SONG Taotao, NI Fengping, ZHANG Qi, et al. Analyzing and accounting for carbon emissions using various accounting techniques: using the example of gas turbines in gas-fired power plants[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(6): 41-46.
- [20] 监勇. 燃气电厂 GHG 计算方法探讨[J]. 资源节约与环保, 2015(3): 42-43.
- JIAN Yong. Discussion on GHG calculation method in gas-fired power plant[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2015(3): 42-43.
- [21] 付忠广, 王霄楠, 卢可, 等. 燃气预热温度对燃气-蒸汽联合循环性能影响[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 16-22.
- FU Zhongguang, WANG Xiaonan, LU Ke, et al. Influence of preheating temperature of nature gas on performance of gas-stem combined cycle[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 16-22.
- [22] 张倩. 基于 Aspen Plus 的煤气化链式燃烧整体联合循环模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 1.
- ZHANG Qian. Simulation and analysis on coal gasification-chemical looping combustion combined cycle system on Aspen plus[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 1.
- [23] 程鲁. 基于 ASPEN 平台的燃气轮机化学回热循环仿

- 真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 1.
CHENG Lu. Simulation research of chemically recuperated gas turbine based on ASPEN platform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 1.
- [24] 候群, 罗小平, 邓聪. 基于 Aspen Plus 的燃气蒸汽锅炉运行特性仿真[J]. 节能, 2021, 40(6): 34-37.
HOU Qun, LUO Xiaoping, DENG Cong. Simulation of gas steam boiler based on Aspen Plus[J]. Energy Conservation, 2021, 40(6): 34-37.
- [25] 王树成, 付忠广, 宋学博, 等. PG9171E 型燃机进气加热对联合循环性能影响分析[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(3): 189-191.
WANG Shucheng, FU Zhongguang, SONG Xuebo, et al. Influence of inlet heating of PG9171E gas turbine on performance of combined cycle power plant[J]. Turbine Technology, 2019, 61(3): 189-191.
- [26] 潘璐. 华能天津 IGCC 电站系统仿真及优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 20.
PAN Lu. Simulation and optimization study of Huaneng Tianjin IGCC Power Station system[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2022: 20.
- [27] 谢传胜, 董达鹏, 贾晓希, 等. 中国电力行业碳排放配额分配——基于排放绩效[J]. 技术经济, 2011, 30(11): 57-62.
XIE Chuansheng, DONG Dapeng, JIA Xiaoxi, et al. Carbon emission quota allocation of electric power sector in China: based on emission performance[J]. Journal of Technology Economics, 2011, 30(11): 57-62.
- [28] 气体中一氧化碳、CO₂ 和碳氢化合物的测定气相色谱法: GB/T 8984—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1.
Determination of carbon monoxide, CO₂, and hydrocarbons in gas chromatography: GB/T 8984 — 2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008: 1.
- [29] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施[R]. 北京: 生态环境部, 2022: 1.
Ministry of Ecology and Environment, National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guidelines for accounting methods and reporting of power generation facilities[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2022: 1.

(责任编辑 邓玲惠)