

面向碳中和的工业尾气电厂技术综述及其 典型案例经济性分析

牟晨璐¹, 丁涛¹, 周郑洋¹, 徐亮², 董晓亮², 汤洪海²

(1. 西安交通大学 电气工程学院 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 北京电力交易中心, 北京 100031)

摘要:实现碳达峰和碳中和的“双碳”目标是国家的重大战略。工业尾气排放是温室气体的主要来源,控制工业尾气碳排放是碳减排工作的关键,探究碳中和背景下利用工业尾气发电实现碳减排的问题,具有重大现实意义。首先概述了尾气电厂的基本原理,以3种典型工业尾气为例,介绍尾气的组成成分和经尾气发电后污染物的变化情况,并介绍了尾气发电技术的基本原理;其次综述了尾气电厂技术方案,分析尾气发电的改造技术和难点,进而对尾气电厂技术方案的优缺点、应用场景、改造技术进行分析和比较,并对尾气电厂技术发展和研究现状进行综述;然后介绍了尾气电厂的典型案例及其效益,从单位造价角度对其进行经济性分析;最后结合我国尾气电厂发展现状,对未来尾气电厂的发展进行了展望,从技术、参与新能源消纳、并网影响、运营模式和政策完善等方面进行了探讨。

关键词:工业尾气电厂;尾气特性;发电技术类型;经济性分析;碳中和

中图分类号:TM 71;X 701

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109034

0 引言

随着社会经济的发展,我国能源生产总量和消费总量稳定增长,但其导致的环境污染和气候变化等问题严重制约社会可持续发展。2021年政府工作报告指出,要加强污染防治和生态建设,进一步推进碳达峰、碳中和有关的各项工作,对我国实现能源结构转型、降污减碳提出了新的要求。

我国能源转型路径将从以煤为主到化石能源、可再生能源和核能并存的多元能源结构,最终实现以风能和太阳能等可再生能源为主体的能源结构^[1-2]。近年来,我国煤炭消费占比呈下降趋势,清洁能源消费占比逐年提升。2019年,煤炭消费量占能源消费总量的57.7%,比2010年减少了11.5%;天然气、水电、核电、风电等清洁能源消费量占能源消费总量的23.4%,比2010年增长了近一倍^[3]。然而目前由于水电、风电、光伏等可再生能源的随机性、不确定性的难题尚未得到解决^[4-6],火力发电的主导地位在未来相当一段时间内不会动摇。因此,减少化石燃料的消耗和提高能源利用率对缓解化石能源紧张、降低污染物排放、减少温室气体的排放依然具

有重要意义。

工业尾气蕴含着丰富的化学能和热能,直接排放会对环境产生污染并造成资源浪费。目前尾气综合利用方式可归为以下3类:利用尾气生产新的化工产品;利用尾气热能;利用尾气发电。尾气电厂利用工业尾气进行发电,将工业尾气中的废能转化为电能,有效降低废气污染物的排放,减少能量损失,提高能源利用率,属于碳中和愿景技术路径中的能效提高范畴^[7];与尾气直接排放相比,在相同负荷下,建有尾气电厂的工厂从电网中购电降低,从而减少了因相应火力发电造成的能源消耗和温室气体排放。尾气发电机组属于资源综合利用机组,在国家 and 地方政策上得到大力支持,在“双碳”经济背景下迎来新的发展机遇。2011年,国家能源局发布《关于进一步开展资源综合利用意见》,该意见为利用余热、余压、城市垃圾和煤矸石、煤泥等低热值燃料及煤层气生产电力、热力,并且单机容量在500 kW以上,为符合并网调度条件的企业并网提供了保障;同时要求电力部门对并网的机组免交小火电上网配套费,并在核定的上网电量内优先购买^[8]。2019年国家发改委、国家能源局印发《关于规范优先发电优先购电计划管理的通知》,通知规定余热、余压、余气、煤层气等资源综合利用机组,应当按照资源条件对应的发电量全额安排计划^[9]。陕西省发改委发布的《关于印发2021年陕西电网统调发电企业优先发电量计划的通知》提出,对资源综合利用机组发电量优先安排计划,是上述国家政策在地方落地的体现^[10]。尾气电厂的发展可以实现资源高效利用和保护生态

收稿日期:2021-07-15;修回日期:2021-08-09

基金项目:国家电网公司总部科技项目(电力市场服务新能源多目标要求的量化分析及技术应用研究)(1400-202135232A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(Quantitative Analysis Technology and Applications of Multi-objective Requirements for Serving Renewable Energy in Power Market)(1400-202135232A-0-0-00)

环境的双重效益,对我国降污减碳具有重要作用。

为实现“双碳”目标提供尾气电厂的理论基础,本文综述了尾气电厂技术方案和发展及研究现状,并对尾气电厂进行典型案例介绍和经济性分析。概述了尾气电厂基本原理,梳理了尾气类型和尾气发电技术类型;综述了尾气电厂技术方案,进而对尾气发电技术进行比较,并综述了尾气电厂发展及研究现状;介绍了尾气电厂的典型案例,从单位造价的角度进行经济性分析;探讨了尾气电厂发展的问题和未来方向。

1 尾气及尾气发电技术类型

尾气电厂是指靠燃烧工业尾气产生电能的发电厂。理论上,尾气电厂适用于任何可燃的工业尾气。但在实际应用中,受限于尾气成分和机组经济性,尾气电厂只在几种尾气类型上得到了较大规模的应用。本节首先介绍尾气电厂的基本原理,然后介绍3种广泛用于尾气电厂发电的尾气类型,最后介绍尾气发电技术类型。

1.1 尾气电厂基本原理

尾气电厂运行模式如图1所示。尾气从工厂排出后,经过收集,运输到尾气电厂,尾气电厂利用尾气发电,产生的电能主要用于工厂自身,多余电能考虑上传电网。我国尾气电厂通常是工厂自建,建有这种电厂的行业包括冶金、油气和化工等行业。主要发电技术有锅炉-蒸汽轮机发电、燃气-蒸汽联合循环发电和燃气内燃机发电等。

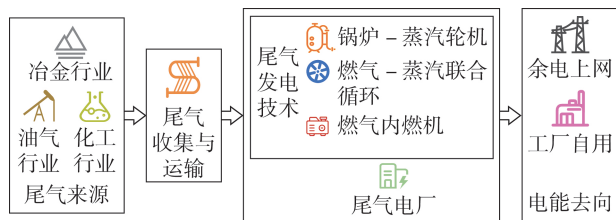


图1 尾气电厂模式图

Fig.1 Model diagram of off-gas power plant

1.2 尾气类型

在我国建有尾气电厂的行业中,以炭黑、黄磷和炼焦行业最为典型,尾气电厂在这些行业中普遍得到应用^[11-13]。本节主要介绍炭黑、黄磷和焦炉尾气的组成成分和尾气经尾气电厂燃烧后的污染物变化情况。

1.2.1 炭黑尾气

炭黑是一种化工原料,广泛用于生产橡胶和塑料。炭黑生产中副产的炭黑尾气,是一种低热值可燃气体,主要成分为 N_2 、CO和 H_2 ,其组成受炭黑种类、原料油来源和生产技术的影响。炭黑尾气的常规组成成分见表1^[11]。除表1所列气体外,炭黑尾气

中还含有少量 H_2S 、 NO_x 和炭黑粉尘。经尾气电厂燃烧后,炭黑尾气中的CO含量大幅降低,燃烧产物经脱硫脱硝除尘净化达标后排入大气,可实现污染物超低排放^[14]。炭黑尾气所含的化学能占炭黑生产总输入能量的51.1%,尾气中的可燃成分约占总量的20%~23%^[15]。据统计,2019年我国炭黑产能 8×10^6 t,按每生产1 t炭黑,副产3 000 m^3 尾气估算,年产炭黑尾气 2.4×10^{10} m^3 ,利用价值巨大。

表1 炭黑尾气常规组成成分

Table 1 Regular components of carbon black off-gas

成分	体积分数	成分	体积分数
CO	9%~13%	H_2	9%~12%
H_2O	36%~40%	N_2	36%~38%
CO_2	2%~3%	CH_4	0.2%~0.8%
O_2	0.2%~0.8%		

1.2.2 黄磷尾气

黄磷是磷化工的重要原料,广泛用于化肥、洗涤剂、食品添加剂等领域。黄磷生产主要采用电炉法,理论上每生产1 t黄磷,副产尾气约为2 500~3 000 m^3 。黄磷尾气主要成分为CO,其他杂质包括S、P、F、As、粉尘以及 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 H_2 等气体,如表2所示^[16]。黄磷尾气燃烧时会对设备造成腐蚀,因此通常经除尘净化后用于发电,燃烧产物中基本不含CO等可燃污染物。由于国内黄磷尾气利用净化处理难度大、成本高、工艺流程复杂,黄磷尾气未能得到有效利用,直接燃烧排放的尾气约占总量的80%^[13],造成严重的环境污染和资源浪费。

表2 黄磷尾气常规组成成分

Table 2 Regular components of yellow phosphorus off-gas

成分	体积分数	成分	质量浓度/($g \cdot m^{-3}$)
CO	82%~95%	P	0.5~1.0
CO_2	2%~4%	S	0.6~3.0
O_2	0.1%~0.5%	As	0.07~0.08
其他	3%~5%	F	0.4~0.5

1.2.3 焦炉尾气

焦炉尾气是炼焦过程的副产品,主要成分为 H_2 、 CH_4 和CO,其组成受炼焦用煤质量和炼焦技术等的影 响,是一种高热值可燃气 体。焦炉尾气的常规组成成分如表3所示^[17]。在一定条件下,焦炉尾气在装有低氮燃烧器的燃气轮机中燃烧能实现 NO_x 超低排放,其排放量远低于常规烧锅炉火电厂的排放量^[18-19]。我国每年在炼焦中产生 $6 \times 10^{10} \sim 8 \times 10^{10}$ m^3 焦炉尾气,约合 $2.5 \times 10^{10} \sim 3.5 \times 10^{10}$ m^3 天然气,超过西气东输输气总量^[20]。目前,我国焦炉尾气综合利用的途径主要是用作化工原料、燃料和制取 H_2 ^[21]。尽管我国焦炉尾气利用率不断提升,每年仍有约20%的焦炉尾气未经利用直接排入大气中,严重破坏生

表3 焦炉尾气常规组成成分

Table 3 Regular components of coke off-gas

成分	体积分数	成分	体积分数
H ₂	54%~59%	CH ₄	24%~28%
CO	5.5%~7.0%	N ₂	3%~5%
CO ₂	1%~3%	C _n H _m	2%~3%
O ₂	0.3%~0.7%		

态环境^[22]。

1.3 尾气发电技术类型

我国尾气发电主要采用火力发电技术,以锅炉-蒸汽轮机发电、燃气-蒸汽联合循环发电和燃气内燃机发电为代表的火力发电技术已经发展成熟。本节主要介绍上述3种尾气发电技术的工作原理。

1.3.1 锅炉-蒸汽轮机

锅炉-蒸汽轮机发电系统主要由燃气锅炉、汽轮机和发电机组成。锅炉-蒸汽轮机工作原理如图2所示。尾气在燃气锅炉中燃烧加热锅炉中的水,从而产生高温高压蒸汽;高温高压蒸汽进入汽轮机内膨胀做功,推动汽轮机叶片转动,进而驱动发电机输出电能。做功后的低压蒸汽进入冷凝器冷却,凝结后经给水泵送回燃气锅炉,继续参与循环。锅炉-蒸汽轮机发电采用朗肯循环,通常以水作为循环工质。在中低温余热回收领域,以低沸点有机工质代替水作为循环工质的有机朗肯循环已经成为节能研究领域的研究热点之一,在工业余热和地热领域有大量的应用案例^[23-24]。与水蒸气朗肯循环相比,有机朗肯循环具有结构简单、工作压力适宜和余热回收效率高等优点^[25],在尾气余热发电领域有广阔的应用前景。

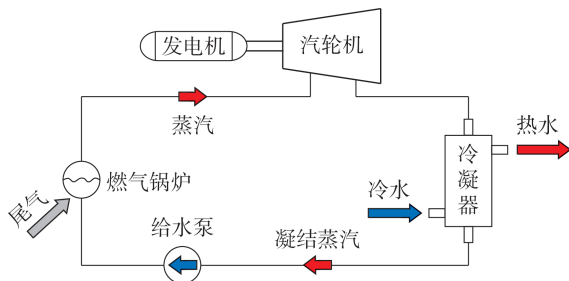


图2 锅炉-蒸汽轮机工作原理图

Fig.2 Schematic diagram of boiler-steam turbine

1.3.2 燃气-蒸汽联合循环

燃气-蒸汽联合循环发电系统主要由燃气轮机发电系统、余热锅炉和蒸汽轮机发电系统组成。燃气-蒸汽联合循环工作原理如图3所示。空气经压气机压缩后与尾气在燃烧室中混合,燃烧产生高温高压烟气在燃气涡轮中膨胀做功,推动发电机发电。经过涡轮做功后的烟气温度降至500℃左右,进入余热锅炉回收热能。与锅炉-蒸汽轮机中锅炉的作用不同,余热锅炉中不发生烟气的燃烧过程,其中的水被高温烟气加热产生蒸汽用于蒸汽轮机发电,

因此本质上是一个烟气-蒸汽的换热器^[26]。燃气-蒸汽联合循环将具有较高进气温度的燃气轮机循环(布雷顿循环)和具有较低出气温度的蒸汽轮机循环(朗肯循环)结合起来,从而具有更高的热效率。与单纯的锅炉-蒸汽轮机循环约40%的热效率相比,燃气-蒸汽联合循环热效率可达60%以上,循环热效率显著提高。

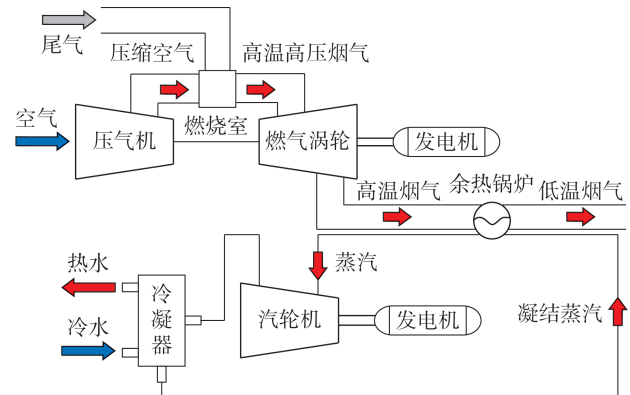


图3 燃气-蒸汽联合循环工作原理图

Fig.3 Schematic diagram of gas-steam combined cycle

1.3.3 燃气内燃机

燃气内燃机的结构和工作原理与液体燃料发动机相似,其工作原理如图4所示。尾气与空气混合,通过涡轮增压器增压、冷却器冷却后进入气缸,经火花塞点火,燃烧膨胀,推动活塞做功;活塞带动曲轴旋转,驱动发电机发电。燃烧产生的废气经涡轮增压器排出。在实际应用中,燃气内燃机与余热锅炉结合构成热电联产系统,在输出电能的同时提供蒸汽,实现能量的梯级利用,综合能源利用率达75%~90%^[27]。在此基础上,还发展出了冷热电联产系统,能够同时满足供冷和供热需求。在该系统中,燃气内燃机与烟气热水溴化锂冷热水机组相连。燃气内燃机的缸套水可以直接供热,也可以和排出的废气一起驱动制冷机制冷,满足制冷需求,提高了能量利用效率^[28]。

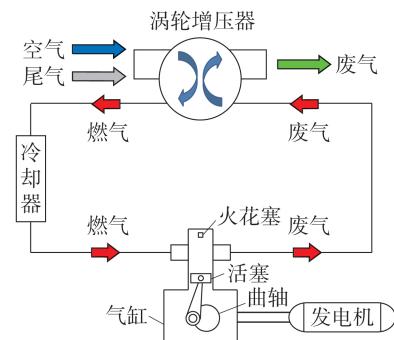


图4 燃气内燃机工作原理图

Fig.4 Schematic diagram of gas internal combustion engine

2 尾气电厂技术方案及发展研究现状

我国炭黑、黄磷和炼焦行业的尾气电厂在发展过程中形成了一定的技术方案取向。本节首先介绍这3个行业主流的尾气发电技术方案,并对尾气发电涉及的改造技术及难点展开论述,然后对3种尾气发电技术进行比较,最后回顾3种尾气电厂技术发展现状,综述当前尾气电厂新的研究方向。

2.1 尾气电厂技术方案

2.1.1 炭黑尾气发电技术方案

炭黑尾气用于发电是国内炭黑企业尾气综合利用的主要方式之一,多采用锅炉-蒸汽轮机发电。由于其具有水分含量高、可燃物含量低、热值低等特点,着火和稳定燃烧较为困难,需要设计专门的炭黑尾气锅炉。国内已有多家企业提出炭黑尾气锅炉方案。文献[29]采用耐火绝热材料将燃烧区和辐射换热区隔开,使两者成为相对独立的区域,防止炭黑尾气燃烧产生的热量迅速被锅炉受热面吸收,从而保证燃烧区有较高的温度,利于炭黑尾气点燃和充分燃烧。文献[30]提出双通道空气旋流燃烧器,该设计在确保炭黑尾气和空气卷吸混合燃烧的同时,推迟两者的混合,保证燃气在高温火焰区富燃料环境下燃烧,阻碍 NO_x 的产生。文献[31]在炉内安装蓄热稳燃装置,其升温后能够与环绕其旋转燃烧的炭黑尾气和空气进行热量交换,起到稳定火焰的作用,有效提高了燃烧区域的温度,使燃烧更加充分和稳定。

2.1.2 黄磷尾气发电技术方案

黄磷尾气综合利用的研究热点之一是利用除尘净化后的黄磷尾气进行锅炉-蒸汽轮机发电,相比于利用尾气生产碳一产品(C1 chemical products),这种方式技术难度较低、经济效益可以预期,被大多数企业采用^[32]。但是黄磷尾气中含有P、S等物质,容易对设备造成腐蚀,大幅降低了蒸汽锅炉的使用寿命和安全性。因此,研制耐腐蚀的黄磷尾气专用锅炉尤为关键。

针对锅炉腐蚀,主要从以下2个方面采取措施:尾气净化和锅炉材料结构的改进。尾气净化装置主要用于脱硫、脱磷和除尘。净化后的尾气中有害成分显著减少,可以直接送入锅炉燃烧。在锅炉材料结构改进方面,国内已有大量的黄磷尾气锅炉设计方案,其中许多已投入使用并取得良好的效果。文献[33]采用受热面独立布置的设计,在炉膛后部增设花格墙,顺流布置低温和高温过热器,对炉膛水冷壁受热面进行超音速喷涂,将部分装置改用抗腐蚀性更强的材料,有效避免P、S等杂质的腐蚀。文献[34]提出将燃烧和换热分开进行的锅炉结构,将蒸发器的高温 and 低温两段串联、中间用烟气通道分隔

的方法和在热管中通入过量空气稀释烟气的措施,解决了锅炉高温烟气腐蚀的难题。文献[13,35]提出在换热主体装置的管板外侧安装防腐保护板,并在螺纹烟管的内壁上安装防腐层,有效保护了锅炉换热主体装置。

2.1.3 焦炉尾气发电技术方案

利用焦炉尾气发电是一项较为成熟的技术,主要有以下3种方式:锅炉-蒸汽轮机发电、燃气-蒸汽联合循环发电和燃气内燃机发电。锅炉-蒸汽轮机发电对焦炉尾气品质要求比较低,是我国焦化企业利用焦炉尾气发电的主要方式,在焦炉尾气发电使用的技术中应用最早也最为成熟,本文不再赘述。近年来,国内大型钢厂陆续建造了利用焦炉尾气和高炉煤气发电的燃气-蒸汽联合循环机组,其中燃气轮机是核心部件。燃气轮机最初设计用于燃烧天然气发电,将燃气-蒸汽联合循环用于焦炉尾气发电的关键在于对改烧焦炉尾气的燃气轮机进行改造。与天然气相比,焦炉尾气含氢量较高,火焰传播速度更快,热值更低,容易引起燃气轮机回火、燃气流量变化等问题^[36]。文献[37]在QD128燃气轮机燃烧室的基础上,重新设计燃用液体燃料和焦炉尾气的双燃料喷嘴,并对火焰筒头部结构进行调整,优化了燃烧室的性能。文献[38]增加PG5316燃气轮机控制系统MARK V的控制程序,使其满足在不同工况下机组运行要求。文献[39]为PG6561燃气轮机的燃料系统设置增压、高温过滤单元,以满足燃机入口温度、压力的要求,同时减少杂质对机组的影响。燃气内燃机在焦炉尾气发电领域也得到了广泛的应用,但由于焦炉尾气含氢量较高,燃烧速度较快,使得燃用焦炉尾气的内燃机存在爆燃倾向大、排气管放炮严重等问题^[40]。文献[41]提出电控混合器、预燃室、数字点火、增压中冷和自动保护等技术,提高了内燃机的功率和安全性。文献[42]提出电子控制多点燃气喷射系统,该系统是电喷技术在国内高含氢燃气内燃机领域的首次应用,解决了进气管回火和排气管放炮的问题。文献[43]提出内混式单缸燃气可控进气系统,并优化配气正时、空燃比,克服了燃焦炉尾气内燃机运行不稳定的问题。

2.2 尾气发电技术比较

目前,我国尾气发电主要采用锅炉-蒸汽轮机,且在不同行业中各种技术类型的应用比例呈现出较大差异。在炭黑、黄磷和焦化行业,锅炉-蒸汽轮机应用最为广泛,并以小容量机组为主,在技术升级方面存在较大空间。在钢铁行业,近年来大型钢厂普遍采用燃气-蒸汽联合循环技术利用高炉煤气和焦炉尾气发电,在减少碳排放和高效利用能源方面取得了显著成效。表4比较了3种尾气发电技术类型的优缺点,并列举了尾气发电技术涉及的改造内容。

表4 尾气发电技术比较

Table 4 Comparison of off-gas power generation technologies

尾气发电技术类型	优点	缺点	应用场景	改造技术
锅炉-蒸汽轮机	对气源要求较低,技术成熟,机组功率范围广	建设周期长,耗水量大,自耗电量 大,辅助设备多,占地面积大, 操作人员多,对操作人员要求高, 发电效率低	炭黑尾气发电 黄磷尾气发电	将燃烧区和辐射换热区隔开, 采用双通道空气旋流燃烧器, 加装蓄热稳燃装置 采用防腐蚀技术
燃气-蒸汽联合 循环	发电效率较高,操作灵活方便, 机动性好,建设周期短,占地面积少, 耗水量少,环保性能好	对气源要求高,建设投资大、 备件昂贵,故障处理难度大, 对装机容量有要求	焦炉尾气发电	改进双燃料和火焰筒头部 结构,增加控制系统功能, 提升燃料供应系统性能
燃气内燃机	发电效率较高,设备高度集成, 安装快捷,耗水量低,建设投资少, 单机容量小,装机规模可灵活配置	材料消耗大,对杂质敏感	焦炉尾气发电	改进进气系统,提出预燃技术, 采用增压处理技术, 开发空燃比自动控制技术

锅炉-蒸汽轮机的优点在于燃料适用范围广,对燃料进气压力和热值没有严格要求,且技术成熟,可以应用于现有的几乎所有尾气电厂;机组功率范围广,能够满足各种规模尾气电厂的发电需求。其缺点也很明显:建设周期长,占地面积大,辅助设备多,操作人员多且要求高;耗水量大,因而不适用于缺水地区的尾气电厂;自耗电量大,发电效率低。

燃气-蒸汽联合循环建设周期短,环保性能好。与同等规模的常规锅炉-蒸汽轮机发电机组相比,燃气-蒸汽联合循环发电机组的热电转换效率提高了约10%,工业净耗水量减少了约2/3,占地面积少,自动化程度更高,且机动性好^[44]。热电转换效率的大幅提高可使燃气-蒸汽联合循环机组CO₂排放量减少,碳减排效果更好。但是该技术对气源的压力和杂质有较高要求,需要在燃气系统前设置处理装置,已运行的电厂在运维中故障率较高^[45];初期投资大,设备检修依赖国外服务商,费用昂贵^[46],故障处理难度大;对单机容量有要求,大多在30 MW及以上,因而对尾气排放量有一定限制。

燃气内燃机的优点在于单机容量小,可以通过调整发电机数量实现不同的装机规模,灵活性更强;发电效率较高,建设投资少,耗水量低,因而经济性和节能减排效果好;设备高度集成,安装快捷。但其对机油、火花塞等材料消耗大,并对杂质敏感,实际运行中故障率较高。

2.3 尾气电厂技术发展现状和研究现状

我国尾气电厂建设起步很早,可追溯至20世纪70年代^[11],但由于尾气电厂技术主要由火电技术改造而来,对改烧尾气后机组各方面性能的变化研究不深入,许多尾气电厂运行后都出现了严重的问题^[13,47]。近年来,随着研究的不断推进,高校和企业的积极参与,尾气电厂在发电技术和装机容量等方面取得显著提升,已有多个尾气电厂参与国家温室气体自愿减排项目,节能减排效果良好。

在锅炉-蒸汽轮机发电领域,国内外多家公司可以提供相应的尾气专用锅炉。我国的尾气锅炉和尾

气发电的研究及应用得到了国家政策的鼓励和支持,应用时间长,技术成熟,国产化程度高,在焦化、冶金等行业得到了广泛的运用^[11,47-48]。国内成熟锅炉企业如杭锅、郑锅、太锅等均生产相应尾气锅炉,有丰富的设计制造经验,生产的尾气锅炉在国内外许多企业投入使用。尾气锅炉作为常规工业锅炉的改造产品,同样存在工业锅炉所具有的缺陷,存在资源消耗大和热效率低等问题^[49],造成资源未被有效利用。随着工业生产规模的扩大,尾气排放量相应增加,原有尾气锅炉的种类和蒸发量已经不能很好地满足实际需求,研制新的大容量、高参数的尾气锅炉尤为重要^[50]。

在燃气-蒸汽联合循环发电领域,主要是将焦炉尾气或转炉煤气掺入高炉煤气进行联合循环发电。目前这种技术只被少数国外燃气轮机制造商掌握,例如通用电气和三菱动力等^[51]。三菱动力从20世纪80年代就开始研发特殊燃烧器和其他设备,在燃高炉煤气的燃气-蒸汽联合循环机组研发和制造方面经验丰富,技术成熟,占有全球60%以上的市场份额^[52]。燃气轮机是燃气-蒸汽联合循环的核心部件。与发达国家相比,我国燃气轮机产业起步并不晚,但目前与发达国家差距很大^[53]。尽管国内燃气轮机公司通过与国外公司合作,具备了制造燃气轮机的能力,但未完全掌握热端部件的设计和制造技术^[54]、涡轮叶片冷却技术^[55]和燃气轮机燃烧调整技术^[46]等关键技术,一定程度上阻碍了我国燃气-蒸汽联合循环技术的发展进程。

在燃气内燃机发电领域,国外多家公司可以提供相应产品,如曼恩、瓦锡兰、现代、通用电气等^[45]。2013年,江苏永钢集团安装了4台1.97 MW由通用电气公司提供的颜巴赫燃气内燃机组,该机组由高炉煤气提供燃料,是世界上第一个投入商业应用的基于燃气内燃机的热电联产机组。我国燃气内燃机行业有一定的设备制造基础,通过自行研发和吸收国外技术,已经逐步掌握了部分关键技术,在动力性、经济性和安全性等方面有了较大提升,但与国际

先进水平仍有一定差距^[56]。目前我国已有几家公司可以提供燃尾气内燃机,如山东胜动集团研发的12V190系列高含氢工业尾气发电机组,已经应用于鲁清石化炼化尾气电厂和太钢冶炼尾气电厂,标志着国产燃气内燃机机组具备应用于大型尾气内燃机电厂的能力。

过去,尾气发电主要集中在对原有发电技术迁移改造方面的研究,缺乏对尾气电厂性能、经济性、调度和环保等方面的研究,近年来许多学者开辟了崭新的研究方向。文献[57]建立了燃焦炉尾气的燃气-蒸汽联合循环尾气电厂系统性能和发电成本的数学模型,并分析了系统关键参数对性能和经济性的影响,最终得出最优系统方案。文献[58]对高炉煤气电厂采用PEPSE软件模拟,为优化尾气电厂的性能提供参考。对电厂进行生命周期成本分析,研究利用尾气发电的经济效益,是生命周期成本分析在利用钢铁厂废气作为发电燃料领域的首次运用。文献[59]研究了分时电价下,配有自发电设备钢铁厂的综合调度问题。通过建立调度问题的多目标数学模型,开发改进的基于关系链的强度帕累托进化算法,对生产计划和电力成本进行优化。文献[60]针对钢铁厂的蒸汽动力系统,建立了混合整数非线性规划模型,以解决钢铁厂将高炉煤气用于燃气锅炉燃料时利用率低的问题,结果表明合理利用热值约束条件可以提高高炉煤气利用率,并降低系统的经济运行成本。文献[61]讨论了碳捕集与封存技术在与钢铁厂相关联的热电联产电厂中的使用,通过开发捕集装置的动态模型,研究钢厂每小时和季节性的负载变化对碳捕集过程的瞬态性能的影响。文献[62]研究了含HCl和H₂S的气体混合物对微量元素锌缩合行为的影响,从热力学和动力学角度讨论在气体混合物(Ar/H₂O/HCl/H₂S)中锌缩合过程的机理,指出Zn等微量元素的冷凝行为对燃气电厂部件的腐蚀影响,并对微量元素吸附剂的选择和设计提供建议。

3 尾气电厂典型案例与经济性分析

近年来,我国尾气电厂项目规模逐渐扩大,对企业降污减碳、提升成本竞争力产生积极影响。本节首先对采用锅炉-蒸汽轮机、燃气-蒸汽联合循环和燃气内燃机的典型案例进行介绍分析,然后分析探讨采用上述3种技术尾气电厂的单位造价,为尾气电厂技术选择提供参考。

3.1 盘虎化工黄磷尾气电厂

云南澄江盘虎化工有限公司黄磷尾气发电综合利用项目位于云南省玉溪市澄江县九村镇东溪哨工业园区云南澄江盘虎化工有限公司主厂区内,占地面积3468.20 m²。该项目采用锅炉-蒸汽轮机发电,

安装1台20 t/h黄磷尾气专用锅炉和1台冷凝式汽轮发电机组,装机容量3 MW,年运行时间7200 h,年发电量 2.16×10^7 kW·h,所发电量供该公司生产自用,不对外供电。该项目利用黄磷尾气发电,年利用黄磷尾气约 4.32×10^7 m³。项目总投资2021.34万元,年平均总成本为536.26万元,年均利润总额为228.73万元,投资利润率11.09%,投资回收期(税后)7.95 a(含建设期)。

在黄磷行业面临淘汰落后产能,加强环保监管的背景下,该项目的建成将有效缓解企业的污染排放压力,每年可减少颗粒物(PM₁₀)排放4.58 t,SO₂排放1.36 t,NO_x排放1.22 t,在实现清洁生产的同时减少企业能耗,降低生产成本。按年发电量折算,每年可节约标准煤5544 t,减少CO₂排放量 1.44×10^4 t,对节能减排有重要意义。

3.2 首钢迁安钢铁煤气电厂

河北首钢迁安钢铁有限责任公司燃气-蒸汽联合循环发电项目位于河北省迁安市首钢迁安公司内,占地面积 3.08×10^4 m²。该项目采用燃气-蒸汽联合循环发电,建设1台139.4 MW燃气轮机、1台余热锅炉、1台60.6 MW蒸汽轮机和1台154 MW蒸汽机组发电机,总装机容量150 MW,年运行时间7200 h,年发电量 1.057×10^9 kW·h,所发电量供公司内部使用。该项目利用钢铁生产过程中产生的富余高炉煤气和焦炉尾气发电,年高炉煤气用量 1.7443×10^9 m³,焦炉尾气用量 1.954×10^8 m³。项目总投资9.02亿元,年利润约3.08亿元。

该项目是国内钢铁行业首个国家温室气体自愿减排项目,于2009年5月5日开工建设,2011年2月并网发电试运行,并于2011年3月2日正式投产。该项目可满足迁安钢铁公司50%以上的用电需求,提升了成本竞争力。按年发电量折算,每年可节省标准煤 3.675×10^5 t,减少CO₂排放量 1.04×10^6 t。该项目配置有较高的净化系统,可极大降低燃烧后废气的含尘量,实现经济效益和生态效益双赢。

3.3 宁夏恒力洁能公司兰炭尾气电厂

宁夏恒力洁能科技有限公司兰炭尾气发电项目位于石嘴山市平罗县宁夏精细化工基地,占地面积8000 m²。该项目采用燃气内燃-蒸汽联合循环发电,建设13台1500 kW燃气内燃机发电机组、2台18 t/h余热锅炉和1台3.5 MW背压式汽轮发电机组,总装机容量23 MW。年运行时间8000 h,年发电量 1.415×10^8 kW·h,年供蒸汽 1.904×10^5 t,所发电接入厂内变电站。该项目利用兰炭项目脱焦后的兰炭尾气发电,年兰炭尾气用量 2×10^8 Nm³。项目总投资10952万元,投资回收期约为3~4 a。

该项目采用的富氢燃气内燃机关键技术获北京市科学技术一等奖,达到国际先进水平,为兰炭企

业利用尾气发电提供了新的途径。一期工程5台燃气内燃机发电机组已建成投产,2020年9月全部并网发电成功。按年发电量折算,每年可节约标准煤 5.66×10^4 t,减少 CO_2 排放量 1.472×10^5 t,有利于企业低碳生产。

3.4 尾气电厂单位造价比较

采用不同发电技术的尾气电厂单位造价呈现出较大差异,这为尾气电厂技术选择提供了一定参考。本节根据近十年来建设的部分尾气电厂经济指标,计算出每个项目的单位造价,通过修正通货膨胀带来的影响(年平均通货膨胀率取2.23%),得出以2020年为基年的单位造价,最终计算出每种技术的平均单位造价,见附录A表A1。

从平均单位造价而言,锅炉-蒸汽轮机单位造价最低,燃气内燃机次之,燃气-蒸汽联合循环机组单位造价最高。单位造价的差异部分是由3种尾气发电技术的国产化程度和应用成熟度不同造成的:锅炉-蒸汽轮机技术国产化程度高,在我国尾气电厂应用时间最长,技术最为成熟;燃气内燃机技术应用在我国尾气电厂的时间不长,技术相对不成熟,但是国内已有多家企业能够提供相应产品,因此造价相对较低;燃气-蒸汽联合循环技术在世界尾气电厂领域应用时间长,技术成熟,但是我国燃气轮机严重依赖进口,造成费用高昂。尽管如此,近年来我国低热值燃气轮机国产化取得了突破性进展,未来有望提高我国尾气发电领域燃气轮机机组国产化比例。附录A表A1列举的本钢板材燃气-蒸汽联合循环发电项目,是国内厂商首次承接超低热值燃气轮机项目。从尾气发电技术类别与装机容量范围的对应关系而言,锅炉-蒸汽轮机装机容量范围最大,从几兆瓦到百兆瓦不等,对各种规模的尾气电厂适应性较强。燃气-蒸汽联合循环机组装机容量多为百兆瓦级,目前主要被大型钢铁企业采用。燃气内燃机单机容量小,总装机容量可以灵活配置,适合中小型尾气电厂。

4 现存问题讨论

目前,我国的尾气电厂基本为工厂自建,单机容量普遍较低,且不同行业使用的尾气发电技术有较大差异,缺乏科学的尾气电厂建造和运维体系,传统的锅炉-蒸汽轮机技术仍占据主导地位,造成能源利用率低下。利用工业尾气发电是实现工业尾气碳减排的重要途径,在碳中和背景下应当发挥更大的作用。尾气电厂的规模化、专业化、产业化有望成为未来的发展方向。在发电技术方面,尾气电厂将向更清洁高效的燃气-蒸汽联合循环发电和燃气内燃机发电转型;在运营模式方面,尾气电厂将打破现在的“工厂自建、发电自用、余电上网”模式,集“尾气收

集、尾气发电、尾气净化”于一体,成为一类独立的电厂。基于此,我国尾气电厂发展还存在以下6点需要改进,可归结为现存问题和未来关注重点2个方面。现存问题主要体现在技术研究不足、职能潜力没有充分发挥以及政策落实不到位,由此总结出未来需要重点关注的6个方向,如图5所示。

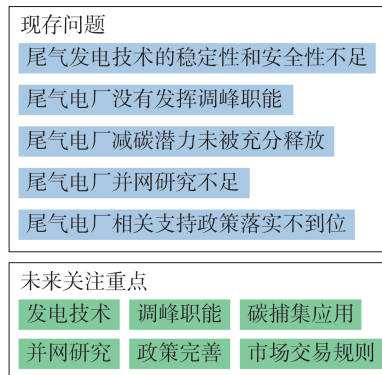


图5 尾气电厂现存问题及未来展望

Fig.5 Existing problems and future prospects of off-gas power plant

1) 尾气发电技术有待突破。

我国尾气电厂的布局决定了尾气电厂气源的单一性。目前用于发电的工业尾气按主要可燃成分大致可分为高 H_2 尾气和高 CO 尾气,对于这2类尾气的燃烧特性和改进技术已有一定研究。未来尾气电厂的气源多样,混合尾气的组成更为复杂,其燃烧特性相对于单一尾气也发生变化,因此针对混合尾气的燃烧特性有待研究,尾气发电技术的适应性有待增强,以满足混合尾气发电的要求,同时对尾气电厂的废气净化技术提出了更大的挑战。如何收集处理各个工厂的尾气并用于发电,保证安全性和稳定性,提高发电效率,是尾气发电技术研究的挑战。

2) 尾气电厂应用碳捕集技术有待加强。

碳捕集与封存技术是实现电力系统零碳排放和负碳排放的关键技术,目前主要应用于传统火电厂,在尾气电厂还没有应用先例。区别于尾气电厂,碳捕集电厂是引入碳捕集技术的传统火电厂,能够将 CO_2 从排放源中捕获并分离出来运输至储存地点进行长期封存,实现零碳排放。尽管尾气电厂利用尾气废能发电提高能效,有助于实现碳中和目标,但其废气中的 CO_2 仍直接排放进大气中,未能实现零碳排放。将碳捕集装置安装在尾气发电机组上,能够实现零碳和负碳排放,使尾气电厂兼有能效提高和碳捕集的促进碳中和功能,发挥更大的碳减排价值,具有良好的应用前景。

3) 尾气电厂调峰能力有待挖掘。

近年来,我国新能源发展迅速,由此引发的新能源消纳受限和调峰能力不足的问题突出。尾气电厂

单机容量小,机动性更好,能够灵活承担调峰任务,与大型火电厂相比具有更低的调峰成本,当其用作调峰电厂时,可视为储能装置。尾气电厂调峰原理如下:在电力负荷低谷时可以减少出力或停机,积累工厂排放尾气的化学能,并启动净化装置对尾气进行净化处理,吸收系统功率;而在电力负荷高峰时可以快速开机,将电网负荷低时积累的尾气化学能转化为电网高峰期的电能,实现尾气发电价值的最大化。此外,装有碳捕集装置的尾气电厂作为碳捕集电厂也能起到调峰作用。发挥尾气电厂的调峰职能,对于加强电网调峰能力,促进新能源消纳,提升电网安全运行水平具有重要意义。

4) 尾气电厂并网对电力系统的影响有待研究。

尾气电厂属于火电厂,其燃料的特殊性使得其与传统火电厂不尽相同,尾气电厂的并网对电力系统可能造成不利影响。尾气电厂燃用工业尾气发电,尾气的物化性质波动会对尾气电厂输出电能造成影响。尾气受生产过程影响波动较大,生产原料、生产负荷、生产条件的变化以及尾气净化等诸多因素都会造成尾气组成成分的波动,进而引起尾气的热值波动,尾气的流量也处于动态变化中。生产过程中尾气的物化性质除了周期性波动外,还会因为生产设备故障而发生突发性大幅波动,影响尾气发电机组的稳定运行,造成各种扰动,影响电能质量。目前缺乏对尾气电厂并网对电力系统影响的深入研究,部分地区电网公司考虑到电网安全不希望尾气电厂上网供电,这对尾气电厂接入电网造成阻碍。

5) 尾气电厂市场交易规则有待探索。

现有的尾气电厂尾气来自工厂自身,优先为工厂供电,发挥了一定的尾气净化功能,热电联产机组还能向工厂提供蒸汽。未来尾气电厂作为独立电厂,向工厂购买尾气,发电送入电网,这一转变将带来诸多矛盾。一方面,尾气电厂的零燃料成本优势不再存在,废气净化难度增大,成本相应增加,其经济效益有待考量;另一方面,出售尾气能够帮助企业减轻尾气治理负担,降低生产成本,但是尾气发电权的转让也增加了企业的购电成本,损失尾气发电带来的经济效益。此外,尾气电厂的并网也会对电力电网公司的利益造成影响。因此,尾气电厂自身经济效益以及电厂-工厂-电力-电网多方利益平衡是市场交易层面实现未来尾气电厂构想所要考虑的关键因素。当前政策为尾气电厂的并网及上网电量的购买提供支持,但由于目前我国尾气电厂多为发电自用,缺乏大量参与并网调度的实例,尾气电厂市场交易规则仍有待探索。

6) 尾气电厂税收和并网政策有待完善。

尽管国家和地方出台了税收和并网优惠的相关政策,但在实施中各地政策落实情况不一。第一,各

地对于尾气电厂项目性质的认定没有统一,利用尾气发电产生电力的税收减免优惠难以落实,增加了发电成本。第二,部分地区存在尾气发电并网困难、售电价格低等问题,企业无法通过尾气发电获得有效益,降低了企业投资尾气电厂项目实现资源综合利用和降污减碳的积极性。尾气电厂税收和并网政策落实的问题存在已久,相关政策实际操作效果不佳,各相关方对政策的理解存在差距,阻碍了尾气电厂的发展。

5 结论

本文对尾气电厂技术方案进行了研究综述和经济性分析。首先对尾气电厂基本原理进行概述。然后分别介绍了尾气类型和尾气发电技术类型。结合炭黑尾气、黄磷尾气和焦炉尾气发电技术方案,总结了不同尾气发电技术的难点,对3种主要的尾气发电技术进行了比较,并综述了尾气电厂技术发展和研究现状。接着分析介绍了3个尾气电厂典型案例,根据调研的尾气电厂数据,基于单位造价进行经济性分析。最后提出了碳中和背景下尾气电厂的发展方向,对当前尾气电厂存在的问题进行探讨,为未来尾气电厂发展提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张尧翔,刘文颖,李潇,等. 高比例新能源接入电网光热发电-火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 1-7.
ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, LI Xiao, et al. Optimal control method of peak load regulation combined concentrating solar power and thermal power for power grid accessed with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 1-7.
- [2] 鲁宗相,黄瀚,单葆国,等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.
- [3] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2021-05-13]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [4] 崔晓丹,吴家龙,雷鸣,等. 新能源高占比电力系统的连锁故障诱因及事故链搜索技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 135-143.
CUI Xiaodan, WU Jialong, LEI Ming, et al. Discussion on inducement and fault chain search technology of cascading failure in power system with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 135-143.
- [5] 贺元康,丁涛,刘瑞丰,等. 新能源消纳电量库交易机制的实践与经验[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 163-169.
HE Yuankang, DING Tao, LIU Ruifeng, et al. Practice and experience of trading mechanism for energy pool of renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Sys-

- tems, 2021, 45(7): 163-169.
- [6] 薛安成, 付潇宇, 乔登科, 等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 118-128.
XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, et al. Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 118-128.
 - [7] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.
 - [8] 国家能源局. 关于进一步开展资源综合利用[EB/OL]. [2021-05-13]. http://www.nea.gov.cn/2011-08/19/c_131059358.htm.
 - [9] 国家发展和改革委员会. 关于规范优先发电优先购电计划管理的通知[EB/OL]. [2021-05-13]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201901/t20190129_962382.html.
 - [10] 陕西省发展和改革委员会. 关于印发2021年陕西电网统调发电企业优先发电量计划的通知[EB/OL]. [2021-05-13]. <http://sndrc.shaanxi.gov.cn/fgyw/tzgg/eqyae.htm>.
 - [11] 范汝新. 从废气到资源: 炭黑行业尾气综合利用进展[J]. 中国橡胶, 2010, 26(23): 19-23.
FAN Ruxin. From waste gas to resources-progress in comprehensive utilization of exhaust gas in carbon black industry[J]. China Rubber, 2010, 26(23): 19-23.
 - [12] 马光宇, 蔡九菊, 谢国威, 等. 富余煤气发电技术在钢铁企业的应用和实践[J]. 冶金能源, 2014, 33(5): 47-50.
MA Guangyu, CAI Jiuju, XIE Guowei, et al. Application and practice of surplus gas to generate electricity technologies in iron and steel enterprise[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2014, 33(5): 47-50.
 - [13] 孙志立, 张冬平. 黄磷尾气在燃煤蒸汽锅炉中应用的可行性分析[J]. 化肥工业, 2016, 43(1): 1-4.
SUN Zhili, ZHANG Dongping. Feasibility analysis of use of yellow phosphorus tail gas in coal-burning steam boiler[J]. Fertilizer Industry, 2016, 43(1): 1-4.
 - [14] 和淑婷. 山东某炭黑企业炭黑尾气利用烟气脱硫脱硝净化技术经济分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2020(9): 74-76.
HE Shuting. Techno-economic study on flue gas desulfurization and denitrification of carbon black tail gas thermal utilization from a carbon black enterprise in Shandong Province[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2020(9): 74-76.
 - [15] 崔庆渊. 试论炭黑生产过程中的节能降耗[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
CUI Qingyuan. Discussion on energy saving and consumption reduction in the production of carbon black[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
 - [16] 吴飞, 邵华萍, 龙晋明. 黄磷尾气热水锅炉腐蚀原因分析及防治措施[J]. 云南化工, 2009, 36(4): 61-65.
WU Fei, GAO Huaping, LONG Jinming. Corrosion reason and prevention measure of yellow phosphorus tail gas-fired hot water boiler[J]. Yunnan Chemical Technology, 2009, 36(4): 61-65.
 - [17] 杨力, 董跃, 张永发, 等. 中国焦炉煤气利用现状及发展前景[J]. 山西能源与节能, 2006(1): 1-4.
YANG Li, DONG Yue, ZHANG Yongfa, et al. The utilization status and development prospect of coke oven gas in China[J]. Shanxi Energy and Energy Conservation, 2006(1): 1-4.
 - [18] 范忠雷, 周玉兵, 刘殿河, 等. 燃气-蒸汽联合循环机组烟气氮氧化物的排放规律[J]. 化工进展, 2019, 38(4): 2056-2062.
FAN Zhonglei, ZHOU Yubing, LIU Dianhe, et al. Emission characteristics of nitrogen oxides from gas steam combined cycle unit[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(4): 2056-2062.
 - [19] 刘海宁, 陆明春. 浅谈钢铁公司自备电厂燃气: 蒸汽联合循环发电技术(CCPP)[J]. 天津冶金, 2007(5): 56-60.
 - [20] 韩晓平. 高效能的焦化煤气发电技术[J]. 电器工业, 2004(11): 40-43.
HAN Xiaoping. High-efficiency coking gas power generation technology[J]. China Electrical Equipment Industry, 2004(11): 40-43.
 - [21] 何海斌. 内燃机燃用焦炉气的燃烧过程仿真及性能优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
HE Haibin. Study of combustion process simulation and performance optimization on internal combustion engine fueled with COG[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
 - [22] 叶圣. 焦炉煤气的综合利用及其意义分析[J]. 矿业装备, 2019(6): 74-75.
YE Sheng. Comprehensive utilization of coke oven gas and its significance analysis[J]. Mining Equipment, 2019(6): 74-75.
 - [23] 高亭亭, 尤清华, 王春民, 等. 大容量地热有机朗肯循环发电机组配置研究[J]. 电力勘测设计, 2021(3): 67-72.
GAO Tingting, YOU Qinghua, WANG Chunmin, et al. Research on configuration of large capacity geothermal organic rankine-cycle generation units[J]. Electric Power Survey & Design, 2021(3): 67-72.
 - [24] 张国伟, 张延平, 吴桐, 等. 钢渣热闷余热回收有机朗肯循环发电技术分析[J]. 冶金能源, 2021, 40(2): 9-12.
ZHANG Guowei, ZHANG Yanping, WU Tong, et al. Technology analysis for steel slag waste heat recovery and organic rankine cycle power generation[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2021, 40(2): 9-12.
 - [25] 吴元旦, 于立军, 朱亚东. 中低温余热发电技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 12-13.
 - [26] 连红奎, 李艳, 束光阳子, 等. 我国工业余热回收利用技术综述[J]. 节能技术, 2011, 29(2): 123-128.
LIAN Hongkui, LI Yan, SHU Guangyangzi, et al. An overview of domestic technologies for waste heat utilization[J]. Energy Conservation, 2011, 29(2): 123-128.
 - [27] 王春松, 宁凤君, 邵宗义. 小型燃气内燃机热电联供系统应用在校区的经济性分析[J]. 区域供热, 2021(1): 108-115.
WANG Chunsong, NING Fengjun, SHAO Zongyi. Economic analysis of the application of small CHP system in school[J]. District Heating, 2021(1): 108-115.
 - [28] 李亚聪. 燃气内燃机冷热电三联供性能分析[J]. 上海节能, 2016(12): 657-661.
LI Yacong. Performance analysis of gas-fired internal combustion engine combined cooling heating and power generation[J]. Shanghai Energy Conservation, 2016(12): 657-661.
 - [29] 王群, 王小兵. 炭黑尾气锅炉设计及其安全运行[J]. 节能, 2008, 27(11): 50-52.
WANG Qun, WANG Xiaobing. Design and safe operation of carbon black tail gas boiler[J]. Energy Conservation, 2008, 27(11): 50-52.
 - [30] 肖雄信. 浅谈炭黑尾气高温高压锅炉的设计[J]. 能源与环境, 2017(5): 47-50.
 - [31] 陈玉村. 浅谈一台 55 t/h 燃炭黑尾气锅炉的设计[J]. 工业锅炉, 2013(4): 18-20.
CHEN Yucun. The design of 55 t/h carbon black tail gas fired boiler[J]. Industrial Boilers, 2013(4): 18-20.
 - [32] MA H, FENG X. Contrast analysis of recycling and utilization approaches of yellow phosphorus tail gas[J]. Chemical Engineering Transactions, 2017(61): 451-456.
 - [33] 吴淑娟. 一种燃黄磷尾气锅炉的设计[J]. 工业锅炉, 2013(5):

- 24-26.
WU Shujuan. Design of yellow phosphorus tail gas fired boiler[J]. Industrial Boilers, 2013(5):24-26.
- [34] 彭元洪,万源,刘新坤,等. 黄磷尾气蒸汽锅炉新技术[J]. 无机盐工业, 2010, 42(8):39-40.
PENG Yuanhong, WAN Yuan, LIU Xinkun, et al. New steam boiler technology for utilization of yellow phosphorus tail gas[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2010, 42(8):39-40.
- [35] 张冬平. 一种黄磷尾气燃气锅炉换热主体装置:CN200920111-879.1[P/OL]. 2010-05-12[2021-05-13]. <https://d.wanfangdata.com.cn/patent/ChJQYXRlbRnROZXdTMjAyMTAxMDkSEENO-MjAwOTIwMTExODc5LjE4CDVjenE4MjI5>.
- [36] 王松岭,董君,陈海平,等. 燃用焦炉煤气的燃气轮机性能分析[J]. 汽轮机技术, 2006(2):108-111.
WANG Songling, DONG Jun, CHEN Haiping, et al. Performance analysis of coke-oven-gas-fired gas turbine[J]. Turbine Technology, 2006(2):108-111.
- [37] 金戈,李孝堂,尹家录,等. 改烧焦炉煤气后燃气轮机燃烧室的改进[J]. 动力工程, 2008, 28(6):875-879.
JIN Ge, LI Xiaotang, YIN Jialu, et al. Design modification of combustor for gas turbine converted to burn coke-oven gas[J]. Power Engineering, 2008, 28(6):875-879.
- [38] 廖柯. PG5361 燃机改烧焦炉煤气时控制系统改造介绍[J]. 科技创新与应用, 2013(36):51-52.
LIAO Ke. The introduction of the control system transformation when PG5361 gas turbine is changed into coke oven gas[J]. Technology Innovation and Application, 2013(36):51-52.
- [39] 潜纪儒,李硕平,许平,等. 焦炉煤气燃机电厂燃料系统的设计[J]. 浙江电力, 2010, 29(7):45-48.
QIAN Jiru, LI Shuoping, XU Ping, et al. Coke oven gas fuel system design for gas turbine plant[J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(7):45-48.
- [40] 孟凡生,阴秀丽,蔡建渝,等. 我国低热值燃气内燃机的研究现状[J]. 内燃机, 2007(3):46-49.
MENG Fansheng, YIN Xiuli, CAI Jianyu, et al. Research status of low heating value gas internal combustion engine in China[J]. Internal Combustion Engines, 2007(3):46-49.
- [41] 张志坚,习桂明. 内燃机利用焦炉煤气发电技术[J]. 山东冶金, 2003(5):66-68.
ZHANG Zhijian, XI Guiming. Technique of taking coking tail gas as fuel to generate electricity by internal combustion engine[J]. Shandong Metallurgy, 2003(5):66-68.
- [42] 康磊. 12V190 电喷焦炉煤气机组的研制[J]. 内燃机与动力装置, 2013, 30(4):11-14.
KANG Lei. Development of 12V190 EFI coke gas generator set[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2013, 30(4):11-14.
- [43] 赵见祥,陈茂松. 焦炉煤气发电机组的研制开发与应用[J]. 内燃机与动力装置, 2016, 33(6):11-14.
ZHAO Jianxiang, CHEN Maosong. The development and application of coke oven gas generator set[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2016, 33(6):11-14.
- [44] 刘刚锋,田维汉,王成军. 燃气-蒸汽联合循环发电技术在武钢的应用[J]. 钢铁研究, 2012, 40(6):48-51.
LIU Gangfeng, TIAN Weihang, WANG Chengjun. Application of gas-steam combined cycle power generation technology in WISCO[J]. Research on Iron and Steel, 2012, 40(6):48-51.
- [45] 赵启成,岳岱巍,李鹏. 高炉煤气余热发电技术方案比选[J]. 华电技术, 2018, 40(8):66-68.
ZHAO Qicheng, YUE Daiwei, LI Peng. Technical comparison and selection for generation scheme with waste heat of blast furnace gas[J]. Huadian Technology, 2018, 40(8):66-68.
- [46] 肖俊峰,王峰,高松,等. 重型燃气轮机燃烧调整技术研究现状及进展[J]. 热力发电, 2021, 50(3):1-8.
XIAO Junfeng, WANG Feng, GAO Song, et al. Research status and progress of heavy gas turbine combustion adjustment technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3):1-8.
- [47] 陈川. 富余高焦炉煤气联合循环发电在马钢的应用[J]. 燃气轮机技术, 2007(4):6-10.
CHEN Chuan. Surplus BFG/COG-based combined cycle power plant for Maanshan Iron & Steel Co. Ltd[J]. Gas Turbine Technology, 2007(4):6-10.
- [48] 张艳. 中国焦炉煤气利用现状评述[J]. 山东化工, 2019, 48(16):172-173.
ZHANG Yan. Review on the current status of coke oven gas utilization in China[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(16):172-173.
- [49] 焦健. 工业锅炉节能减排现状、存在的问题及对策[J]. 节能, 2019, 38(9):133-134.
JIAO Jian. The status, existing problems and prospects of industrial energy conservation[J]. Energy Conservation, 2019, 38(9):133-134.
- [50] 孙怀起,田丽焕,马捷林. 炭黑生产中余热综合利用的若干问题[J]. 天津化工, 2003(6):52-53.
SUN Huaiqi, TIAN Lihuan, MA Jieli. Several problems of comprehensive utilization of waste heat in carbon black production[J]. Tianjin Chemical Industry, 2003(6):52-53.
- [51] 张志平,张雨欣,李科. 冶金企业燃气蒸汽联合循环发电的应用与发展[J]. 包钢科技, 2019, 45(5):72-74.
ZHANG Zhiping, ZHANG Yuxin, LI Ke. Applications and development of gas-steam combined cycle power generation in metallurgical enterprises[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2019, 45(5):72-74.
- [52] Mitsubishi Power, Ltd. MHPS receives order from China's Baotou steel for two blast furnace gas-fired Gas Turbine Combined Cycle(GTCC) power generating units[EB/OL]. [2021-05-14]. <https://power.mhi.com/news/20200414.html>.
- [53] 蒋洪德,任静,李雪英,等. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29):5096-5102.
JIANG Hongde, REN Jing, LI Xueying, et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5096-5102.
- [54] 杨功显,张琼元,高振恒,等. 重型燃气轮机热端部件材料发展现状及趋势[J]. 航空动力, 2019(2):70-73.
YANG Gongxian, ZHANG Qiongyuan, GAO Zhenheng, et al. Developing status and trends of hot component materials for heavy gas turbines[J]. Aerospace Power, 2019(2):70-73.
- [55] 张浩,李录平,唐学智,等. 重型燃气轮机涡轮叶片冷却技术研究进展[J]. 燃气轮机技术, 2017, 30(2):1-7.
ZHANG Hao, LI Luping, TANG Xuezhi, et al. Review of heavy-duty gas turbine blade cooling technology[J]. Gas Turbine Technology, 2017, 30(2):1-7.
- [56] 黄宇. 分布式能源系统燃气内燃机国产化现状及应用[J]. 煤气与热力, 2016, 36(3):26-31.
HUANG Yu. Localization present situation and application of gas engine-driven distributed energy system[J]. Gas & Heat, 2016, 36(3):26-31.
- [57] 武文杰. 焦炉煤气燃气轮机联合循环电厂系统特性分析与优化设计[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
WU Wenjie. System analysis and optimization of combined cycle power plant based on coke oven gas fueled gas turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [58] KIM Y K, LEE E B. Optimization simulation, using steel plant off-gas for power generation: a life-cycle cost analysis approach[J]. Energies, 2018, 11(11):2884.

- [59] CAO J, PAN R, XIA X, et al. An efficient scheduling approach for an iron-steel plant equipped with self-generation equipment under time-of-use electricity tariffs[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 60: 100764.
- [60] ZHANG Q, ZHAO T, NI T, et al. Optimization models for operation of a steam power system in integrated iron and steel works[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 43(9): 1100-1114.
- [61] MARTINEZ C G, BIERMANN M, MONTAÑÉS R M, et al. Integrating carbon capture into an industrial combined-heat-and-power plant: performance with hourly and seasonal load changes[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 82: 192-203.
- [62] ZHAO X, WU G, QI J, et al. Investigation on the condensation behavior of the trace element zinc in (Ar/H₂O/HCl/H₂S) gas mixtures and its practical implications in gasifica-

tion-based processes for energy and power generation[J]. *Fuel*, 2021, 295: 120600.

作者简介:



牟晨璐

xjtu.edu.cn)。

牟晨璐(1997—),女,重庆人,硕士研究生,研究方向为电力系统经济运行(E-mail: muchenludew@stu.xjtu.edu.cn);

丁涛(1986—),男,陕西宝鸡人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电力系统经济运行、电力市场、能源经济等(E-mail: tding15@mail.xjtu.edu.cn);

周郑洋(2000—),男,湖北宜昌人,研究方向为电力系统经济运行(E-mail: vigour@stu.xjtu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Technology review on industrial off-gas power plants for carbon neutral and economic analysis of typical cases

MU Chenlu¹, DING Tao¹, ZHOU Zhengyang¹, XU Liang², DONG Xiaoliang², TANG Honghai²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Beijing Power Exchange Center, Beijing 100031, China)

Abstract: Achieving the dual goals of carbon peak and carbon neutral is an important strategy of China. Industrial off-gas emission is one of the main greenhouse gas emissions, and industrial off-gas carbon emission control is the key to reduce carbon emissions. Exploring the problem of achieving carbon emission reduction by using industrial off-gas to generate electricity has immense practical significance under the background of carbon neutral. Firstly, the fundamental principle of the off-gas power plant is briefly summarized. Taking three typical types of industrial off-gas as examples, the composition of off-gas and the change of pollutants after off-gas power generation are introduced. The basic principles of off-gas power generation technology are also introduced. Secondly, the technical solutions of off-gas power plants are summarized, and technology transformations and difficulties of off-gas power generation are analyzed. Furthermore, the advantages, disadvantages, applications and technology transformations of off-gas power generation schemes are analyzed and compared. The development and research status of off-gas power plant technology are reviewed. Thirdly, the typical cases and their benefits are introduced, and their economic analysis of off-gas power plants from the perspective of the unit cost are conducted. Finally, combined with the current practice of off-gas power plants in China, the future development of off-gas power plant is summarized, and the technology, participation in new energy accommodation, influence of grid connection, operation mode, and improvement in policy are discussed.

Key words: industrial off-gas power plant; off-gas characteristic; power generation technologies; economic analysis; carbon neutral

附录 A

表 A1 尾气电厂单位造价比较

Table A1 Comparison of unit cost for off-gas power plants

尾气发电 技术	项目名称	总装机 容量/MW	总投资/万元	单位造价/ (元•kW ⁻¹)	平均单位造价/ (元•kW ⁻¹)
锅炉-蒸汽轮 机	云南澄江盘虎化工有限公司黄磷 尾气发电综合利用项目	3	2021.34	6737.8	5288.28
	山西安仑化工有限公司 15 MW 分布式炭黑尾气发电项目(二期)	15	5034.88	3356.59	
	神木市北海煤电有限公司 1×30 MW 余能尾气发电 2 号机组项目	30	13700	4566.67	
	神木同得利煤化工有限公司 2×12 MW 兰炭尾气发电项目	24	12948	5395	
	江西黑猫炭黑股份有限公司 1×20 MW 尾气余热发电供热工程	20	13500	6750	
	天津市金龙科技有限公司 3 MW 炭黑尾气发电项目	3	1306	4353.33	
	河北首钢迁安钢铁有限责任公司 燃气-蒸汽联合循环发电项目	150	90200	6013.33	
燃气-蒸汽联 合循环	新疆哈密淖毛湖低热值 燃气发电项目	493	298600	6056.80	6645.66
	马钢股份公司燃气-蒸汽联合循环 综合利用发电工程	183	121045	6614.48	
	本钢板材燃气-蒸汽联合 循环发电项目	180	86700	4816.67	
	包钢钢联股份有限公司余压余气节 能减排 2×165 MW CCGP 发电项目	330	240730	7294.85	
燃气内燃机	宁夏恒力洁能科技有限公司 兰炭尾气发电项目	23	10952	4761.74	6471.50
	包头市海平面高分子工业有限公司 九原分公司电石尾气发电项目 一期工程	16.62	10200	6137.18	
	包头海平面高分子工业有限公司九 原分公司电石尾气发电项目二期	12.42	6600	5314.01	
	纳雍县新春煤矿瓦斯发电项目	2.4	2000	8333.33	
	四明化工燃气分布式能源站	13.203	8700	6589.41	