

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.012

太阳能光热发电现状及超临界 CO₂ 光热发电技术应用前景

Development status of solar thermal power generation and prospect of supercritical carbon dioxide technology applied in it

何志瞧¹, 童家麟²
HE Zhiqiao¹, TONG Jialin²

(1. 浙江浙能兰溪发电有限责任公司, 浙江 兰溪 321100; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

(1. Zhejiang Zheneng Lanxi Power Generation Company Limited, Lanxi 321100, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310014, China)

摘要: 太阳能光热发电技术具有调度方式灵活、可显著减少弃光、易与其他可再生能源互补发电等优势, 美国等国家对于太阳能光热发电技术的研究和规模化应用较早, 我国在太阳能光热发电方面研究、利用较晚, 但近年来发展速度较快, 并呈现出与美国等国家不同的特点。对近年来美国和中国光热发电技术的发展历程进行了概述, 详细分析了适合光热发电技术的超临界 CO₂ 布雷顿循环发电系统的特点、优势, 并对其应用前景进行了展望。

关键词: 太阳能光热发电; 现状; 超临界 CO₂ 布雷顿循环; 可再生能源; 弃光; 储能

中图分类号: TM 615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)04-0077-07

Abstract: Solar thermal power generation technology is of flexible dispatching mode, and can greatly alleviate the abandon of solar power, and is highly complementary with other renewable energy. Research and scale application of solar thermal power generation technology developed early in America, but started late in China. However, the technology is thriving in China and shows distinguished characteristics from that in America and other countries. After introducing the development of solar thermal power generation technology in America and China in recent years, the characteristics and advantages of applying supercritical carbon dioxide Brayton cycle in solar thermal power generation is analyzed, and its prospect in power generation system is expounded.

Keywords: solar thermal power generation; status quo; supercritical carbon dioxide Brayton cycle; renewable energy; solar power abandon; energy storage

0 引言

2018 年全球一次能源消费增长了 2.9%, 几乎是 2008—2017 年平均增速的 10 倍, 也是 2010 年以来的最高增速, 说明全球经济增长呈上升趋势, 但这也给能源消费和碳排放控制带来新的压力。值得欣喜的是, 一次能源消费增长主要由天然气和可再生能源驱动, 其中天然气和可再生能源的增速分别达到了 5.3% 和 14.5%, 说明全球能源结构调整速度加快, 清洁能源已进入了规模化发展的新阶段。但是, 2018 年全球碳排放增长了 2.0%, 为近 7

年来的最高增速, 这与煤炭消耗量持续增长有关^[1]。因此, 大力发展可再生能源仍是现阶段的迫切需求。

太阳能作为重要的可再生能源之一, 近年来在全球能源体系中占据越来越重要的地位。2018 年全球太阳能发电量达到了 584.6 TW·h, 占新能源发电量的 23.6%, 其中中国、美国、日本位居前 3 位。太阳能发电大致可分为太阳能光伏发电和太阳能光热发电 2 大类, 与太阳能光伏发电相比, 太阳能光热发电具有调度运行方式灵活、可显著减少弃光、储能成本更低等优势, 被认为是最具竞争力的新能源发电模式之一^[2-4]。目前, 太阳能光热发电仍基于水蒸气朗肯循环原理, 使得光热电站的循环效率难以进一步提升; 同时, 基于该循环方式的发电系统

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-02-21
基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目
(5211DS180036)

会在一定程度上加剧太阳能资源较为丰富但相对缺水地区的水资源压力。近年来逐渐兴起的超临界 CO₂(S-CO₂)布雷顿循环具有发电效率高、对水资源依赖度低、适用热源范围广等优势,可能是未来最适宜于光热电站的发电循环方式^[5-6]。因此,本文以美国和中国光热发电技术为研究对象,介绍这两个国家光热发电技术的发展历程和技术特点,并对 S-CO₂布雷顿循环在光热发电领域的应用前景进行展望。

1 美国太阳能光热发电技术发展历程

美国是最早建设太阳能光热电站的国家,早在 20 世纪 80 年代初,Luz 公司就开发了槽式太阳能光热发电的关键部件。1983—1991 年,Luz 公司在美国加利福尼亚州 Mojave 沙漠相继建成了 9 座槽式光热发电站,总装机容量达 354 MW^[7],所发电量加入加州爱迪生电网,其中 SEGS I 和 SEGS II 电站已于 2015 年年底至 2016 年年初相继停运,其余电站至今仍在运营。SEGS I 和 SEGS II 电站停运原因并不是设备老化,而是未能与加州爱迪生电力公司成功续签,这可能与美国近年来对太阳能光热发电的政策支持力度减弱有关。在电站拆除过程中发现,尽管多数反射镜和集热管等核心组件都安装于 30 年前,但设备的整体情况良好,超出了预期。SEGS I 和 SEGS II 电站的实际运行情况表明,光热电站的老化速度很慢,这为其带来了更大的全寿命周期售电收益。

表 1 为现阶段美国已投产的 5 大光热电站,其中 Solana 电站是大型槽式带储能电站的样本,Ivanpah 电站是世界上首个商业化运营的百兆瓦级塔式电站,而 Crescent Dunes 电站则是大型商业化熔盐塔式电站的标杆工程。值得注意的是,美国的太阳能光热电站呈现出一个特点:配备储能系统的光热电站比例较低,5 大光热电站中仅有 Solana 电站和 Crescent Dunes 电站配备储能系统,这使得 Ivanpah 等非储能电站在不同季节需要不同量的天然气进行补燃,以确保电站能在辐照状况不佳的天气下稳定运行。以 Ivanpah 电站为例,2017 年 4 月天然气补燃占比为该年度最高,达 9.63%,而 5 月占比最低,仅为 2.59%。

从上述电站 2015 年度的运行结果看,Genesis Solar 电站年实际发电量达到了年设计发电量的 107%,而同期的 Solana 电站和 Ivanpah 电站年实际发电量仅为年设计发电量的 76% 和 62%。3 个电站投产时间较为接近,排除各自需要的学习过渡期等因素,其主要原因是:槽式无储热电站运行方式更

表 1 美国已投产 5 大太阳能光热电站

Tab. 1 The five largest solar thermal power plants in the United States

电站	形式	装机容量/ MW	储热 时长/h	冷却 方式	投运 时间
Solana	槽式有储能	140×2	6	水冷	2013 年
Ivanpah	塔式无储能	126+133×2	0	空冷	2014 年
Genesis Solar	槽式无储能	125×2	0	空冷	2014 年
Mojave Solar	槽式无储能	140×2	0	水冷	2014 年
Crescent Dunes	塔式有储能	110	10	空冷+ 水冷	2016 年

注:数据来源于光热发电网 CSPPLAZA。

为简便,更容易被运行人员掌握,也更易达到设计发电量目标;而 Ivanpah 电站是早期大型塔式商业化电站,2015 年仍处在摸索运行阶段,发电量不如预期亦在情理之中;光热电站配置储热系统后,系统的复杂程度大为增加,需要更长时间优化运行方式。尽管配备储能系统的 Solana 电站同期发电量比 Genesis Solar 电站高于 16%,但其初投资远大于 Genesis Solar 电站,且发电预期也低于后者,因此其平准化度电成本(LCOE)可能不如 Genesis Solar 电站,这也为我国光热电站是否必须配备储能系统提供了参考。图 1 为国际可再生能源机构(IRENA)根据美国 Solana 电站相关运行数据计算得出的光热发电成本与太阳倍数(集热环节容量/发电环节容量的值)、储热时长的关系。由图 1 可知,光热发电成本与太阳倍数、储热时长均密切相关,因此,是否配备储能系统还需结合电站设计的太阳倍数等综合考虑。此外,从近年来投产的采取“光热发电+”开发模式电站的实际运行情况看,光热发电与地热、生物质、传统化石燃料的多能互补均可实现 24 h 持续发电,这可能是储能系统之外的可行互补方式。

由表 1 亦可知,美国已投产的 5 大光热电站存在一定数量的水冷机组,光热电站大多选址在太阳能资源丰富而水资源相对贫瘠的地区,大量消耗水资源可能会对环境造成较大影响,如 Solana 电站等就因消耗大量水资源而受到了一定质疑。以一个 50 MW 光热发电站为例,采用水冷方式平均 1 年用水量约为 160 万 m³,但如果采用空冷或空冷+水冷方式,年用水量可减少为 40 万 m³。因此,空冷机组较水冷机组更适用于光热电站。

2 中国太阳能光热发电技术发展历程

与美国、西班牙等光热发电产业已处于成熟化商业阶段的国家相比,我国太阳能光热发电刚刚起

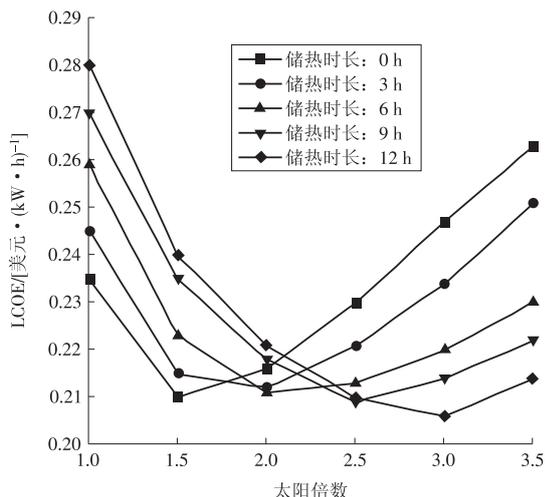


图 1 光热发电成本与太阳倍数、储热时长的关系
Fig. 1 Relationship between CSP cost, solar multiple, and heat storage duration

步,属于公认的朝阳产业,目前仍处于大规模推广的阶段。2012年,国家863计划“太阳能光热发电技术及系统示范”重点项目——延庆八达岭1 MW塔式光热发电示范项目经过6年的努力成功发电,尽管该项目具有一定的研究性质,但在我国光热发电产业发展史上具有里程碑意义。2013年,青海中控太阳能德令哈10 MW塔式光热电站并网发电,标志着我国自主研发的太阳能光热发电技术向商业化运行迈出了坚实的步伐。该电站是我国首座成功

投运的规模化储能光热电站,也是全球第3座投运的具备规模化储能的塔式光热电站。

从2014年开始,我国对太阳能光热发电的政策支持力度明显加强,陆续推出了一系列支持太阳能光热发电的政策^[8],特别是2016年9月,国家能源局正式发布了《国家能源局关于建设太阳能光热发电示范项目的通知》,随后首批大型商业化光热发电项目进入实质性建设阶段。首批光热发电项目总装机容量约为1.35 GW,核定光热发电标杆上网电价为1.15元/(kW·h)。尽管国家在上网电价、低息贷款等多方面均对上述项目进行了实质性支持,但截至目前,仍有部分项目因为资金、技术、股权、体制等问题未开工建设。

2018年,我国首个大型商业化光热电站示范项目——中广核德令哈50 MW光热示范项目正式投运,标志着我国成为世界上第8个掌握大规模光热发电技术的国家。表2为我国已投运和即将投运的部分大型光热发电项目的技术参数^[9-12]。

由表2可知,我国光热电站的技术路线较广,基本覆盖了槽式、塔式、菲涅尔式等国际主流技术路线,值得注意的是,其中还包含了类菲涅尔式、二次反射塔式等在国际上率先应用的技术路线,这标志着我国光热发电技术已在一定程度上处于国际领先水平。

表 2 我国已投运和即将投运的部分大型光热发电项目技术参数

Tab. 2 Technical parameters of some large-scale CSP projects that have been or will be put into operation in China

项目名称	技术路线	装机容量/MW	储热时长/h	投运时间
中控德令哈10 MW示范光热项目	塔式熔盐	10	2	2016年
北京首航敦煌10 MW熔盐塔式光热项目	塔式熔盐	10	15	2016年
华强兆阳张家口光热项目	类菲涅尔式混凝土	15	14	2018年
中广核太阳能德令哈槽式光热发电项目	槽式导热油	50	9	2018年
北京首航敦煌塔式光热发电示范项目	塔式熔盐	100	11	2018年
青海中控德令哈塔式光热发电项目	塔式熔盐	50	6	2018年
中国电建共和塔式光热发电项目	塔式熔盐	50	6	2019年(已并网)
鲁能海西格尔木50 MW塔式光热发电项目	塔式熔盐	50	12	2019年(已并网)
中国电力工程哈密50 MW塔式光热发电项目	塔式熔盐	50	13	2019年(已并网)
大成敦煌50 MW线性菲涅尔式光热发电项目	菲涅尔式熔盐	50	15	2019年(已并网)
玉门鑫能50 MW塔式光热发电项目	二次反射塔式熔盐	50	9	建设中
中核龙腾乌拉特中旗100 MW槽式光热发电项目	槽式导热油	50	10	建设中
玉门龙腾50 MW槽式光热发电项目	槽式导热油	50	10	建设中
达华尚义50 MW塔式光热发电项目	塔式水工质	50	4	准备建设
金钒阿克塞50 MW熔盐槽式光热发电项目	槽式熔盐	50	15	准备建设
中海阳玉门东镇槽式光热发电项目	槽式导热油	50	7	准备建设
中阳察北64 MW槽式光热发电项目	槽式熔盐	64	16	准备建设
华强兆阳张家口类菲涅尔式光热发电项目	类菲涅尔式混凝土	50	14	准备建设
中节能武威槽式光热发电项目	槽式导热油	100	7	准备建设
北京首航玉门100 MW熔盐塔式光热发电项目	塔式熔盐	100	10	准备建设

此外,我国光热发电项目与美国已投产光热发电项目相比呈现出不同特点:一是大型光热发电项目均配备储能系统,可实现 24 h 不间断发电;二是汽轮机排汽均为空冷方式,这与国家相关政策有关^[13]。除上述示范项目外,涉及光热发电的 2 个多能互补项目——鲁能海西州多能互补集成优化示范项目和张家口张北风光热储输多能互补集成优化示范项目步入实质性建设阶段,为我国有效地利用可再生能源提供了新的思路。

3 基于 S-CO₂ 布雷顿循环的光热发电技术

现阶段我国光热电站均以空冷为机组的主要冷却方式,尽管选型时已经尽可能节约水资源,但由于机组发电仍采用水蒸气朗肯循环,对水资源相对缺乏的西部地区造成了一定的压力^[14]。因此,对水资源依赖度较低的 S-CO₂ 布雷顿循环无疑是未来适宜于光热发电的热力学循环之一。与传统的水蒸气朗肯循环和 He 布雷顿循环相比, S-CO₂ 布雷顿循环在中等压力(8~20 MPa)和中等温度(450~650 °C)下具有较高的热循环效率^[15],究其原因: CO₂ 的临界压力(7.38 MPa)和温度(31.1 °C)均较低,相对于水蒸气和 He,更容易达到超临界状态;同时,当循环工质处于超临界状态时,由于避免了工质相态的改变,减少了压缩机的功耗,更有利于提升循环效率。此外, S-CO₂ 布雷顿循环仅需外部提供 500~800 °C 的温度,这是现有太阳能聚光器和吸热器很容易达到的温度^[16]。

图 2 为基于 S-CO₂ 布雷顿循环的太阳能光热发电系统,该系统主要包括定日镜、吸热器、加热器、回热器、冷却器、气轮机、压气机等设备,与常规基于水蒸气朗肯循环的太阳能光热发电系统相比, S-CO₂ 布雷顿循环由于增加了 CO₂ 压缩过程,降低了回热器的端部温差及冷却器热损失,从而提高了系统的经济性^[17]。若图 2 中常规岛采用再压缩 S-CO₂ 布雷顿循环(如图 3 所示),则系统循环效率有望进一步提高^[18]。

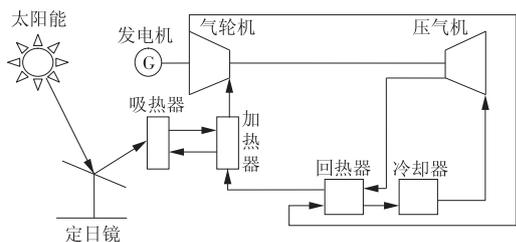


图 2 基于 S-CO₂ 布雷顿循环的太阳能光热发电系统
Fig. 2 Solar thermal power generation system based on S-CO₂ Brayton cycle

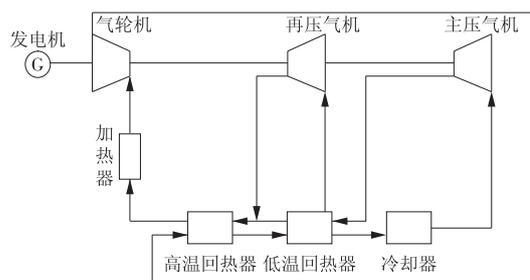


图 3 再压缩 S-CO₂ 布雷顿循环系统

Fig. 3 Recompressed S-CO₂ Brayton cycle system

S-CO₂ 布雷顿循环在光热发电中应用具有以下优势。

(1) 系统具有更高的循环热效率。表 3 为我国已投产某光热电站常规岛主要设计参数,由表 3 可知,该电站汽轮机组设计循环热效率为 45.5%。由图 4 所示的无回热系统的 3 种介质热力学循环效率对比结果可知,若工质温度超过 420 °C, S-CO₂ 布雷顿循环具有明显优势。结合 Fleming D 等^[19]的研究成果可知,若机组采用 S-CO₂ 布雷顿循环,在 CO₂ 工质温度约为 550 °C 的情况下,有回热系统的 S-CO₂ 布雷顿循环热效率可上升至 52%~57%,该温度下的水蒸气朗肯循环热效率难以进一步提高^[20],而 He 布雷顿循环若达到 50% 以上的循环效率,则工质温度需超过 700 °C。

表 3 某光热电站常规岛主要设计参数

Tab. 3 Main parameters of a conventional island for a CSP plant

项目	参数
汽轮机额定进汽压力/MPa	12.6
汽轮机额定功率/MW	100
汽轮机排汽冷却方式	空冷
吸热器设计温度/°C	720
汽轮机额定进汽温度/°C	550
汽轮发电机组循环热效率/%	45.50
回热级数	8
机组光电转化效率/%	16.01

(2) 对系统相关热力设备腐蚀程度较低。高温高压的水蒸气对金属管壁腐蚀作用较强,近年来,不少机组高温受热面管材均出现了不同程度的氧化皮脱落等问题,而高温 CO₂ 化学性质较为稳定,对金属管壁的腐蚀程度较低^[21]。

(3) 大幅降低水资源消耗。尽管现阶段绝大多数光热电站均采用空冷方式,但水蒸气朗肯循环及清洗反射镜面等均需消耗大量水资源, S-CO₂ 布雷顿循环由于不存在水处理系统,极大程度降低了对环境的压力。

(4) 降低初投资成本,提升项目经济性。CO₂ 在

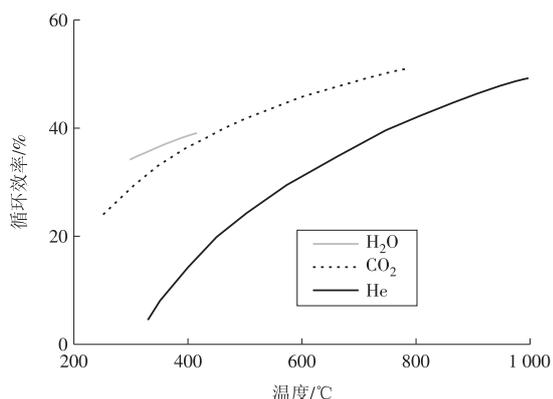


图 4 3种介质的热力学循环效率对比

Fig. 4 Comparison of thermodynamic cycle efficiency of three media

超临界状态下具有密度高、黏性低等特点,使得气轮机、压气机等设备体积大为减小,CO₂气轮机尺寸仅为现有汽轮机的 1/10,可进一步降低太阳能光热发电系统的初投资成本。

(5)将 CO₂资源化利用。CO₂是一种温室气体,S-CO₂布雷顿循环提供了一种将 CO₂资源化利用的有效方法,具有一定的社会效益。

S-CO₂布雷顿循环的研究最早可追溯至 1948

年,美国等国家在 20 世纪 60—70 年代对 S-CO₂布雷顿循环开展了较多的研究,但受限于紧凑型涡轮机械制造技术,研究并未取得实质性进展。21 世纪以来,在能源、环保等问题加剧的前提下,S-CO₂布雷顿循环技术引起了世界各国的关注。美国能源部于 2011 年开始实施太阳能有效利用的“SunShot”计划^[22],其中包括全球首个 10 MW S-CO₂发电机组项目的研发与测试,2019 年该项目涡轮机通过了性能测试,被证实满足所有机械指标,可提供全球工业透平范围内最高的功率密度,若大规模商业化应用,可大幅提高光热电站的运行效率。表 4 为美国国家可再生能源实验室(NREL)提出的基于 S-CO₂布雷顿循环发电的第 3 代太阳能光热发电技术发展路线,其从成本和效率 2 方面设定了目标,并提出了以熔融盐、颗粒和气体为太阳能集热过程传热流体的技术方案,代表了今后若干年可能的技术研发路径。我国近年来对 S-CO₂布雷顿循环技术的研究亦取得了重大进展,2018 年成功研制了国内首台兆瓦级 CO₂压缩机。压缩机是 S-CO₂布雷顿循环系统的核心部件,其成功研制对于我国 S-CO₂布雷顿循环技术发展具有里程碑意义。

表 4 第 3 代太阳能光热发电技术发展路线

Tab. 4 Development of the third generation CSP technology

目标	传热流体		
	熔融盐	下落颗粒	气体
吸热器	成本 < 150 美元/(kW·h), 转换效率 > 90%, 出口温度 > 720 °C, 循环寿命 > 1 000 次	模拟到示范试验、 腐蚀试验	难以提高吸热效率 需承受高压、吸收比控制 和热损失管理
材料和支撑 控制	成本 < 1 美元/kg, 运行温度在 250 ~ 800 °C	潜在应用是氯化盐或碳酸盐, 需关注腐蚀问题	即将确定合适材料 需降低压力损失,关注 腐蚀失效
储热	成本 < 15 美元/(kW·h), 能量效率 > 99%, 可用能效率 > 95%	直接储热或间接储热	直接利用粒子进行储热 间接储热,需增设换热器
传热流体到 S-CO ₂ 换热器	需同时解决好腐蚀和流体 换热问题	有很大挑战,成本和效率 都需兼顾	不适用

4 结束语

太阳能光热发电技术具有调度运行方式灵活、可显著减少弃光、储能成本更低等优势,近年来日益受到关注。美国等西方国家对其研究和规模化应用较早,一大批成熟的太阳能光热电站的投运对我国光热电站的发展提供了大量的宝贵经验。我国太阳能光热发电起步较晚,但近年来发展速度较快,2018 年我国太阳能光热发电新增装机 200 MW,有 4 个大型光热项目成功并网,另有数个项目正在建设中,已逐步向国际化迈进。我国太阳能光热电

站在技术路线、储能系统、冷却方式等方面呈现出与美国等国家不同的特点,部分技术已处于国际领先水平。此外,我国 S-CO₂布雷顿循环技术也已取得令人欣喜的成果,其核心部件——兆瓦级 CO₂压缩机的成功研制对于我国 S-CO₂布雷顿循环技术发展具有里程碑意义。S-CO₂布雷顿循环发电系统作为适合太阳能光热发电的另一发电系统,较传统水蒸气朗肯循环发电系统具有循环效率高、水资源消耗少和腐蚀性低等优势,必将在未来的太阳能光热发电中得到充分应用。

参考文献:

- [1] 英国石油公司. BP 世界能源统计年鉴:2019(第 68 版) [EB/OL]. http://cngascn.com/public/uploads/file/20190805/20190805102652_80658.pdf.
- [2] 陈林, 张鹏. 太阳能光伏与光热发电对比简析[J]. 黑龙江科学, 2015, 6(12): 32,35.
CHEN Lin, ZHANG Peng. Comparison of solar photovoltaic and solar thermal power generation [J]. Heilongjiang Science, 2015, 6(12): 32,35.
- [3] 李勤超, 周立中, 赵艳龙, 等. 基于分布式光伏典型日曲线的统调负荷预测方法[J]. 浙江电力, 2019, 38(6): 113-117.
LI Qinchao, ZHOU Lizhong, ZHAO Yanlong, et al. A unified dispatch load forecasting method based on the typical daily load curve of distributed PV power [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(6): 113-117.
- [4] 周金辉, 盛晔, 苏义荣, 等. 含高比例光伏的配电网电压协调控制策略研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(4): 7-13.
ZHOU Jinhui, SHENG Ye, SU Yirong, et al. Research on coordinated distribution network voltage control strategy with high proportion photovoltaics [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(4): 7-13.
- [5] 黄裕荣, 侯元元, 高子涵. 国际太阳能光热发电产业发展现状及前景分析[J]. 科技和产业, 2014, 14(9): 54-56.
HUANG Yurong, HOU Yuanyuan, GAO Zihan. The development status and prospect analysis of international concentrating solar power industry [J]. Science Technology and Industry, 2014, 14(9): 54-56.
- [6] 晋文超, 葛宋. 国外超临界二氧化碳循环发电技术发展及应用前景[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(6): 6-9.
JIN Wenchao, GE Song. The international development of supercritical carbon dioxide Brayton cycle power generation technology and its application [J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(6): 6-9.
- [7] 吴毅, 王佳莹, 王明坤, 等. 基于超临界 CO₂ 布雷顿循环的塔式太阳能集热发电系统[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 108-113.
WU Yi, WANG Jiaying, WANG Mingkun, et al. A towered solar thermal power plant based on supercritical CO₂ Brayton cycle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 108-113.
- [8] 蔡洁聪, 王伟, 郑建平. 太阳能光热发电技术研究进展[J]. 中外企业家, 2019(4): 124-126.
CAI Jiecong, WANG Wei, ZHENG Jianping. Research progress of solar photothermal power generation technology [J]. Chinese & Foreign Entrepreneurs, 2019(4): 124-126.
- [9] 蔡肇颖. 全国首座规模化熔盐储能光热电站成功投运[J]. 杭州(周刊), 2016(19): 58.
- [10] 亚洲首座全天候熔盐塔式光热电站发电[J]. 设备管理与维修, 2017(2): 7.
- [11] 王璐. 中国首个大型太阳能光热示范电站正式投运[J]. 电力设备管理, 2018, 25(10): 92.
- [12] 黄湘, 白凤武, 王佩明, 等. 太阳能热发电产业蓝皮书 2017[R]. 北京: 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟, 2018.
- [13] 李洪川. 对我国开发太阳能光热电站的几点思考[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(1): 57-58.
LI Hongchuan. Some suggestions on development concentrating solar power in China [J]. Electric Power Environmental Protection, 2017, 33(1): 57-58.
- [14] 李方方, 袁亚周, 吴怡. 太阳能光热发电现状及前景分析[J]. 上海节能, 2016(7): 397-399.
LI Fangfang, YUAN Yazhou, WU Yi. Current situation and prospect analysis on concentrated solar power generation [J]. Shanghai Energy Conservation, 2016(7): 397-399.
- [15] 梁墩煌, 张尧立, 赵英汝, 等. 压力对超临界二氧化碳布雷顿循环系统的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(4): 578-582.
LIANG Dunhuang, ZHANG Yaoli, ZHAO Yingru. Influence of pressure on the thermal performance of the S-CO₂ Brayton cycle [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(4): 578-582.
- [16] 曹蕾, 孙登科, 李维成, 等. 超临界 CO₂ 在电力行业的应用及现状[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(3): 1-7, 13.
CAO Lei, SUN Dengke, LI Weicheng, et al. Application and current situation of S-CO₂ in power industry [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 1-7, 13.
- [17] 叶侠风, 潘卫国, 尤运, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电领域的应用[J]. 电力与能源, 2017, 38(3): 343-347.
YE Xiaofeng, PAN Weiguo, YOU Yun, et al. Application of supercritical carbon dioxide Brayton cycle in power generation fields [J]. Power & Energy, 2017, 38(3): 343-347.
- [18] 王兵兵, 乔加飞. 再压缩式超临界二氧化碳布雷顿循环的特性研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(9): 763-772.
WANG Bingbing, QIAO Jiafei. Characteristic analysis of an S-CO₂ recompression Brayton cycle [J]. Journal Of Chinese Society Of Power Engineering, 2018, 38(9): 763-772.
- [19] 赵新宝, 鲁金涛, 袁勇, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电机组中的应用和关键热端部件选材分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 154-162.
ZHAO Xinbao, LU Jintao, YUAN Yong, et al. Analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle and candidate materials of key hot components for power plants [J].

Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 154-162.

739-745.

[20]郭嘉琪,王坤,朱含慧,等.超临界CO₂及其混合工质布雷顿循环热力学分析[J].工程热物理学报,2017,38(4):695-702.

[22]杜尔顺,张宁,康重庆,等.太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5765-5775.

GUO Jiaqi, WANG Kun, ZHU Hanhui, et al. Thermodynamic analysis of Brayton cycles using supercritical carbon dioxide and its mixture as working fluid[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(4): 695-702.

DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5765-5775.

[21]鲁金涛,赵新宝,袁勇,等.超临界二氧化碳布雷顿循环系统中材料的腐蚀行为[J].中国电机工程学报,2016,36(3):739-745.

(本文责编:刘芳)

LU Jintao, ZHAO Xinbao, YUAN Yong, et al. Corrosion behavior of alloys in supercritical CO₂ Brayton cycle power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3):

作者简介:

何志瞧(1973—),男,浙江诸暨人,高级工程师,从事火力发电厂锅炉设备管理工作(E-mail:hezhiqiao@landideal.com)。

“资源化烟气治理技术专刊”专刊征稿启事

烟气治理是环境保护的重要一环,也是多数工业生产过程的组成部分。在燃煤电站、钢铁、化工、冶金、水泥、玻璃、化工等典型烟气源行业中,烟气治理的投资成本可达总投资成本的10%~50%,而运行成本可达总生产成本的10%~40%,经济负担和资源/能源的消耗量都是巨大的。然而,烟气治理中的目标污染物经过合适的处理和转化,也可成为工业资源,如SO₂或H₂S可以转化为单质硫或硫酸、硫酸盐;氮氧化物可制备硝酸;一氧化碳、有机挥发性气体(VOCs)等可氧化提供热量等。资源化的烟气治理可以使烟气中的污染物变废为宝,节约工业资源并产生经济效益,是环境与资源可持续发展的有效助力。

为此,《华电技术》作为行业科技创新、技术交流平台,特推出“资源化烟气治理技术专刊”,并邀请山东大学程星星教授、华北电力大学肖海平副教授担任特约主编,欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征文范围

围绕发展现状与趋势综述、新概念、新理论、新技术、新装备、过程优化、机理剖析以及典型案例研究等内容,主要征集以下方向论文。

(1)协同资源回收的脱硫技术:烟气中硫的转化路径;硫的资源化产品价值分析;硫资源化利用新技术;兼顾资源回收的脱硫技术;脱硫废水的资源回收技术等。

(2)氮氧化物的资源化治理:烟气中氮氧化物的资源转化产物和潜力分析;低能耗低物耗的氮氧化物治理技术;提高氮氧化物治理过程可持续性的新技术及其过程研究等。

(3)VOCs的能量/物质再利用:VOCs治理过程中的能量利用技术及优化;VOCs中的资源提取和回收;不同行业的VOCs资源化利用潜力和新思路等。

(4)烟气颗粒物的工业利用:烟气颗粒物的形态分析及利用场合挖掘;烟气颗粒物中可利用部分的演变规律和促进策略,如玻璃微珠、特定金属氧化物等;颗粒物利用的产业链创新等。

(5)其他烟气污染物的资源化治理技术:烟气中其他可回收资源回收途径及应用价值分析;其他烟气污染物的治理技术和资源化潜力,如重金属的回收、热解气体中焦油的利用;多污染物协同脱除技术;烟气中水资源的回收利用等。

二、时间进度

专刊拟于2020年8月31日截稿,2020年8期(8月25日)后择期出版。

三、征文要求

(1)专题只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容真实性和客观性负责。(2)按照《华电技术》论文格式要求使用Word软件排版,请登录《华电技术》在线采编系统(<http://www.hdpower.net>)在下载中心下载论文模板。(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

(1)在线投稿(推荐):登录《华电技术》在线采编系统(<http://www.hdpower.net>),完成在线全文投稿。

(2)邮箱投稿:xcheng@sdu.edu.cn(程教授);xiaohaiping@ncepu.edu.cn(肖教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)

(3)咨询联系:刘芳 0371-58501060 13838002988;杨满成 010-63918755 13801175292