

# 我国锅炉装备绿色低碳发展路径研究

李军, 笄耀东, 刘雪敏\*, 于吉明, 常勇强, 侯娜娜

(中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

**摘要:** 锅炉作为高耗能特种设备, 在电力、供热、钢铁等行业及日常生活中广泛应用, 是保障国民经济发展和人民生活的重要基础设施; 锅炉装备能源消耗、大气污染物、碳排放量大, 开展锅炉装备绿色低碳转型升级对实现碳达峰、碳中和目标具有重要的支撑意义。本文从锅炉装备节能降碳的需求出发, 对电站锅炉、工业锅炉两类产品分别进行讨论, 总结了我国锅炉装备的发展态势, 分析了存在的问题。在此基础上, 根据电站锅炉和工业锅炉装备自身特点, 综合考虑生产、使用、检验检测等环节和燃料供应、使用工况、运行水平等因素, 提出了电站锅炉改造升级、工业锅炉低碳转型、锅炉制造绿色发展、锅炉使用管理水平提升等锅炉装备绿色低碳发展路径, 并阐述了相应的具体措施。最后, 本文从加强科技创新、健全公共服务体系和完善法律法规与标准体系3个方面提出了对策建议, 以期为推进锅炉装备制造业转型升级、实现锅炉装备绿色低碳发展提供参考。

**关键词:** 锅炉装备; 低碳发展; 节能增效; 燃料结构调整; 智能化运行

**中图分类号:** TK01      **文献标识码:** A

## Green and Low-Carbon Development Path of Boiler Equipment in China

Li Jun, Da Yaodong, Liu Xuemin\*, Yu Jiming, Chang Yongqiang, Hou Nana

(China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** As special equipment with high energy consumption, boilers are widely used in electric power, heating, steel, and other industries and in daily life. It is a significant infrastructure for guaranteeing economic development and people's life. Energy consumption, air pollutants, and carbon emissions of boilers are large. Therefore, green and low-carbon transformation of boiler equipment is crucial for realizing carbon peak and carbon neutrality. In this paper, power station boilers and industrial boilers are discussed separately from the perspective of energy conservation and carbon emission reduction of boiler equipment, the development trend of boiler equipment in China is summarized, and existing problems are analyzed. Based on the characteristics of the power station and industrial boilers, and considering the stages of production, use, and inspection, as well as the factors of fuel supply, operating conditions, and operation level, green and low-carbon development paths of boiler equipment are proposed, including upgrade of power station boilers, low-carbon transformation of industrial boilers, green development of boiler manufacturing, and use and management level improvement. Moreover, corresponding measures are expounded. Finally, countermeasures and suggestions are proposed from three aspects: strengthening scientific and technological innovation, perfecting public service system, and improving laws, regulations, and standards system, so as to provide a reference for promoting the transformation and upgrading of the boiler equipment manufacturing industry and realizing the green and low-carbon development of boiler equipment.

**收稿日期:** 2022-04-22; **修回日期:** 2022-06-14

**通讯作者:** \*刘雪敏, 中国特种设备检测研究院高级工程师, 研究方向为锅炉能效检测评价与节能减排; E-mail: liuxuemin@csei.org.cn

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

**Keywords:** boiler equipment; low-carbon development; energy conservation and efficiency promotion; fuel structure adjustment; intelligent operation

## 一、前言

锅炉在电力、供热、石化、化工、钢铁、有色、造纸等行业及日常生活中广泛应用，是保障国民经济发展和人民生活的重要基础设施，也是主要的能源消费装备和重要的大气污染物及碳排放源。按照用途分类，锅炉主要分为电站锅炉与工业锅炉。粗略测算，2020年，全国锅炉能源消费量超过 $1.8 \times 10^9$  tce。因此，提升锅炉能效水平、优化燃料结构、减少CO<sub>2</sub>排放，实现绿色低碳高质量发展，对我国实现碳达峰、碳中和目标具有重要的支撑意义。

电站锅炉是燃煤火电厂的三大主机之一。实现“双碳”目标、火电碳减排，需要不断提高清洁能源发电比例 [1]，未来煤电装机及电量将逐步经历“增容控量”“控容减量”“减容减量” [2]，意味着电站锅炉在电力生产中发挥的作用将逐渐转变；电站锅炉将“严控增量，主动减量，优化存量”，加快节能提效升级改造，通过煤炭与污泥、生活垃圾等生物质的混合混烧等，降低CO<sub>2</sub>排放量 [3]，走低碳发展的路径。

按照国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》要求，需推进重点用能设备节能增效，全面提升工业锅炉的能效标准。针对工业锅炉，已有研究构建了工业锅炉碳排放计量指标，分析了工业锅炉行业降碳措施的有效性，提出了调整优化燃料结构的策略 [4]；同时，也有研究提出，通过促进锅炉等关键耗能设备的绿色升级和改进，实现最大限度挖掘节能潜力的目的 [1]。

为进一步梳理我国锅炉装备高质量发展路径，本文从锅炉装备的节能降碳出发，对电站锅炉、工业锅炉两类产品类型进行讨论，总结我国锅炉装备的发展态势与目前存在的问题，提出锅炉装备绿色低碳发展路径及需求建议，以期为碳达峰、碳中和目标下我国锅炉装备绿色、低碳发展提供参考。

## 二、我国锅炉装备发展态势及存在的问题

锅炉是目前我国最主要的能源消费和碳排放设备。“十一五”以来，我国加大了锅炉节能减排工

作力度，推行了煤电结构优化和转型升级、燃煤工业锅炉节能环保综合提升工程等一系列政策措施，大幅提升了锅炉节能环保水平。由于大量淘汰小容量燃煤工业锅炉，我国锅炉数量在2014年后呈现出明显的下降趋势，如图1所示。截至2020年年底，我国锅炉数量约有 $3.56 \times 10^5$ 台，其中电站锅炉有 $1.36 \times 10^4$ 台，工业锅炉约有 $3.42 \times 10^5$ 台，相比于2013年的峰值下降了44.5%，主要是由于工业锅炉数量大幅下降所致。我国工业锅炉2011—2021年的产量变化如图2所示。2014年，我国工业锅炉产量达到峰值，约为 $5.58 \times 10^5$  t/h，之后保持在 $4 \times 10^5$  t/h

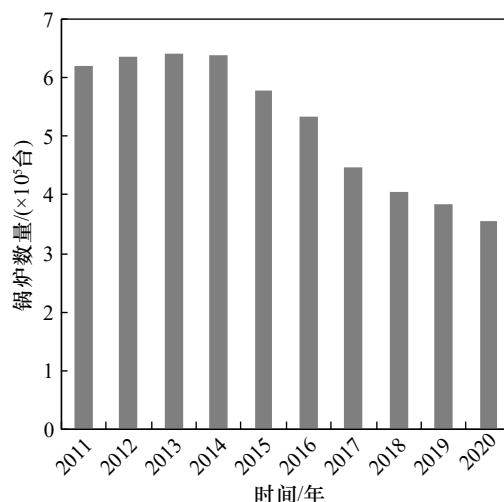


图1 2011—2020年我国锅炉数量变化情况

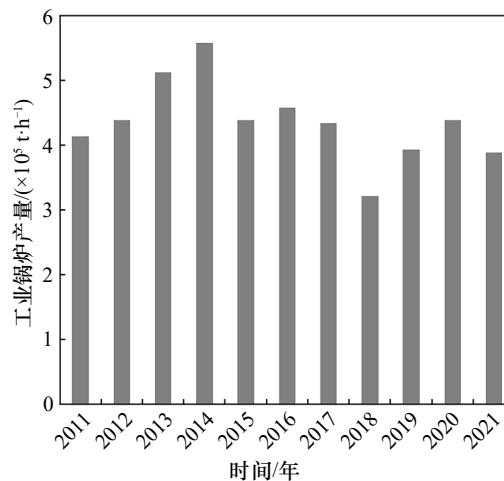


图2 2011—2021年我国工业锅炉产量变化情况

左右，并未出现显著下降，由此可见，“煤改气”“煤改电”“以大代小”等举措带来的锅炉产量仍相当可观。

(一) 锅炉装备发展态势

1. 电站锅炉装备的发展态势

电站锅炉不断向大容量、高参数、低排放发展，已达到的主汽压力为31~35 MPa、温度为600~615℃，再热汽温为620~630℃，并向参数更高的650℃、700℃等级迈进 [5]。近年来，我国火电结构变化显著，超超临界机组比例明显提高（见图3）。截至2020年年底，我国600 MW及以上火电机组容量占全国火电总装机容量的比重达46%，其中1000 MW级超超临界机组占比超过12%。在火电平均供电煤耗方面，由2011年的330 g/(kW·h)持续下降至2020年的305.5 g/(kW·h) [5]，火电机组能效水平持续提升；到2025年，全国火电平均供电煤耗将进一步降至300 g/(kW·h)以下。

与一次再热机组相比，二次再热机组可降低供电煤耗约8~10 g/(kW·h)，1000 MW等级600℃/620℃/620℃超超临界二次再热机组已于2016年投运，供电煤耗为266.18 g/(kW·h)；国际首创的安徽平山1350 MW高低位布置超超临界二次再热机组也已投入运行。大唐郟城630℃超超临界二次再热发电项目于2017年被列为国家电力示范项目，相关参数为35 MPa/615℃/630℃/630℃。未来，超高参数的二次再热机组仍是电站锅炉装备的重要发展方向 [6]。针对高参数锅炉炉内高效燃烧与多

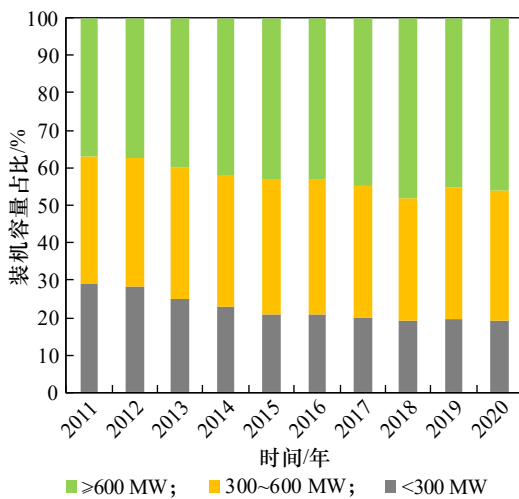


图3 2011—2020年我国火电结构变化

场协同污染控制，也已开展大量研究，实现了锅炉安全、高效、清洁、多目标燃烧过程的优化控制 [7]。另外，燃煤火电机组烟尘、硫化物及氮氧化物的排放数据持续下降，2017年的烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>排放量分别为0.06 g/(kW·h)、0.26 g/(kW·h)、0.25 g/(kW·h) [8]。生物质发电迅速发展，截至2020年年底，装机容量（含垃圾焚烧发电）已达2.95×10<sup>7</sup> kW，占全国发电装机容量的1.34%。

2. 工业锅炉装备发展态势

工业锅炉逐步向燃料清洁化、大型化、高效率发展。2012—2021年，工业锅炉定型产品测试燃料类型变化情况如图4所示。其中，燃煤工业锅炉定型产品数量大幅下降，自2018年开始，每年不足50台；天然气是近年来新增工业锅炉产品中最主要的燃料类型，其次是生物质。通过大量淘汰落后燃煤锅炉，工业锅炉燃料结构已得到根本性改善，燃气锅炉已占工业锅炉总数的50%以上（见图5）。近年来，工业锅炉定型产品测试最大额定热功率变化情况如图6所示，各燃料类型工业锅炉最大额定热功率或蒸发量均在不断突破。目前，燃煤工业锅炉最大额定热功率已达168 MW，燃气工业锅炉为

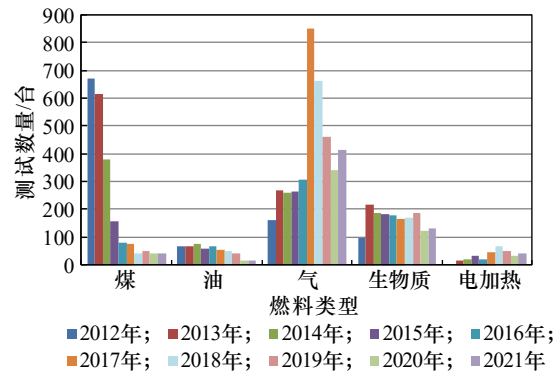


图4 工业锅炉定型产品测试燃料类型变化

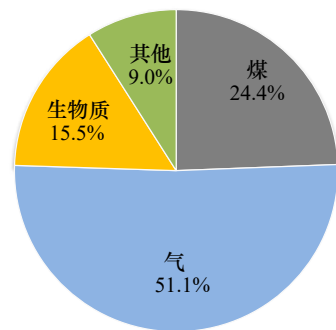


图5 工业锅炉燃料结构

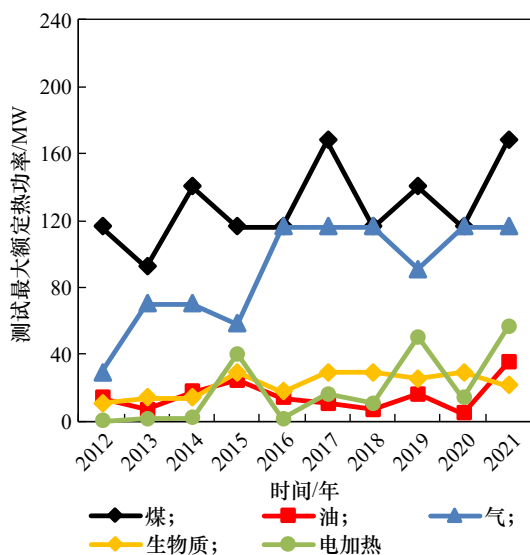
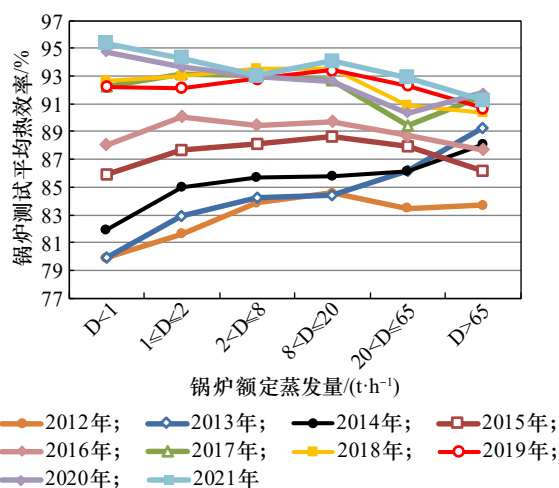


图6 工业锅炉定型产品测试最大额定热功率变化

116 MW, 电加热工业锅炉最大额定蒸发量为80 t/h。工业锅炉定型产品测试热效率的变化情况如图7所示。2017年之前, 工业锅炉定型产品的平均测试热效率呈现明显的升高态势, 主要是由于燃煤锅炉测试数量逐年下降、燃气锅炉测试数量逐年上升所致; 2018年之后, 基本呈现出稳定趋势。同时, 工业锅炉自动化水平也不断提高, 能耗高、污染重的状况得到明显改善。

## (二) 锅炉装备存在的问题

在电站锅炉方面, 我国电站锅炉的节能环保水平较高, 但还存在大容量、高参数机组所占比例有

图7 工业锅炉定型产品测试热效率变化  
注: “D”表示锅炉额定蒸发量。

限、平均供电煤耗与先进机组仍存在一定差距、大量燃煤电站锅炉仍有节能增效改造空间等问题。电力行业作为主要的碳排放行业, 为实现碳中和目标, 增加清洁能源发电比例、减少燃煤电站锅炉数量势在必行, 同时, 还需提升燃煤机组灵活性, 解决新能源消纳问题。

对于工业锅炉, 由于设计制造、运行管理水平参差不齐, 平均运行热效率与设计值有较大差距, 仍存在一定的能源浪费。同时, 由于其量大面广、使用分散的特点, 碳捕集、利用与封存技术(CCUS)的应用难度较大, 低碳化发展面临的形势更为复杂。为此, 需综合考虑燃料供应、使用工况、运行水平等多方面因素, 提出合理可行的工业锅炉碳减排路径。

## 三、锅炉装备绿色低碳发展路径

### (一) 发展方向

我国碳中和目标的实现需要电力系统完全脱碳, 同时尽可能实现全经济部门电气化。因此, 未来新能源占比将迅速提高, 煤电则逐步由主体电源向基础性、调节性电源转变[9], 2030年前煤电装机容量、发电量仍将有一定增长。不同学者对面向2060年的煤电发电量及占比进行了预测[2,10~13], 预测结果虽各有不同, 但整体来看, 煤电发电量将先于装机容量, 在2025—2030年实现达峰, 相应的碳排放峰值约为 $4 \times 10^9$  t, 之后进入快速下降阶段, 2050年之后下降速度趋于缓慢; 煤电发电量占比将逐年下降, 2030年煤电发电量占比预计为40%~55%, 2060年将下降至5%以内, 相应的碳排放约为 $5.3 \times 10^8$  t, 煤电装机容量约为 $4 \times 10^8$  kW。目前, 大多数在役煤电机组是在2000年以后陆续投运的, 将于2035—2050年进入退役高峰; 后续新建煤电机组将服役至2055年以后, 通过与CCUS技术配合, 保留的煤电装机容量可为先进高效的发电技术提供应用空间, 如采用超高参数超超临界发电技术、超临界CO<sub>2</sub>循环发电技术等。因此, 对于电站锅炉, 其发展方向主要包括: ①对全部煤电机组进行灵活性改造制造, 提供灵活调节能力以实现新能源的消纳, 并确保能源供给安全; ②因地制宜推广生物质纯烧发电和生物质耦合发电技术, 发挥生物质碳中性优势; ③进一步提升机组能效水平, 发挥能源消

费量减少的降碳贡献，针对存量机组实施节能增效改造及提升使用管理水平，针对新建机组采用先进高效发电技术；④应用CCUS技术，实现燃煤发电脱碳。

工业锅炉装备的绿色低碳发展将与电站锅炉相协调。按照国家发展和改革委员会、国家能源局发布的《全国煤电机组改造升级实施方案》，“十四五”期间，将进一步推进供热改造，积极关停采暖和工业供汽小锅炉，为此，工业锅炉数量将进一步下降，燃煤工业锅炉仍是淘汰重点。天然气、生物质的用量将持续增加，电网削峰填谷、集中式可再生能源并网等带来的储能需求也将为工业锅炉燃料结构调整提供新的路径；氢储能技术制取的零碳燃料可掺入天然气燃烧使用，蓄热式工业电锅炉也将随着电力系统能源结构调整和工业部门电气化水平提升而实现广泛应用。此外，按照国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》部署，还需要全面提升工业锅炉的能效标准。因此，对于工业锅炉，其发展方向主要包括：燃料结构调整，实现源头减碳；提升能效标准及使用管理水平，进一步提高锅炉能效，实现过程降碳。

## （二）发展路径

根据电站锅炉和工业锅炉装备自身特点，综合

考虑生产、使用、检验检测等环节和燃料供应、使用工况、运行水平等因素，从电站锅炉改造升级、工业锅炉低碳转型、锅炉制造绿色发展、锅炉使用管理水平提升等方面进行分析，阐述锅炉装备绿色低碳发展路径（见图8）。

### 1. 电站锅炉改造升级

持续推动节能增效改造。截至2019年年底，全国煤电机组节能改造规模已超过 $7 \times 10^8$  kW，涉及锅炉的节能增效改造主要包括常规锅炉提效改造、高温亚临界综合升级改造、烟气余热深度利用改造、供热改造等。“十四五”期间，供电煤耗在 $300 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 以上的煤电机组改造规模不低于 $3.5 \times 10^8$  kW，供电煤耗降低预计可累计减少电力 $\text{CO}_2$ 排放约 $7 \times 10^7$  t。

加快实施灵活性改造制造。重点对300 MW及以下的煤电机组进行灵活性改造，对于调峰困难地区研究推动600 MW亚临界煤电机组灵活性改造。对于纯凝机组，通过耦合储热技术，实现锅炉和汽轮机解耦，使负荷变化不受锅炉最低稳燃负荷影响，进一步降低调峰深度[14,15]。对于热电联产机组，在采暖期运行期间调峰能力提升的核心问题在于热电解耦。目前国内大部分燃煤锅炉低负荷稳燃能力在40%~50%额定负荷，通过改造，可下探至20%~30%额定负荷[11]。2022年1月，大唐秦岭电

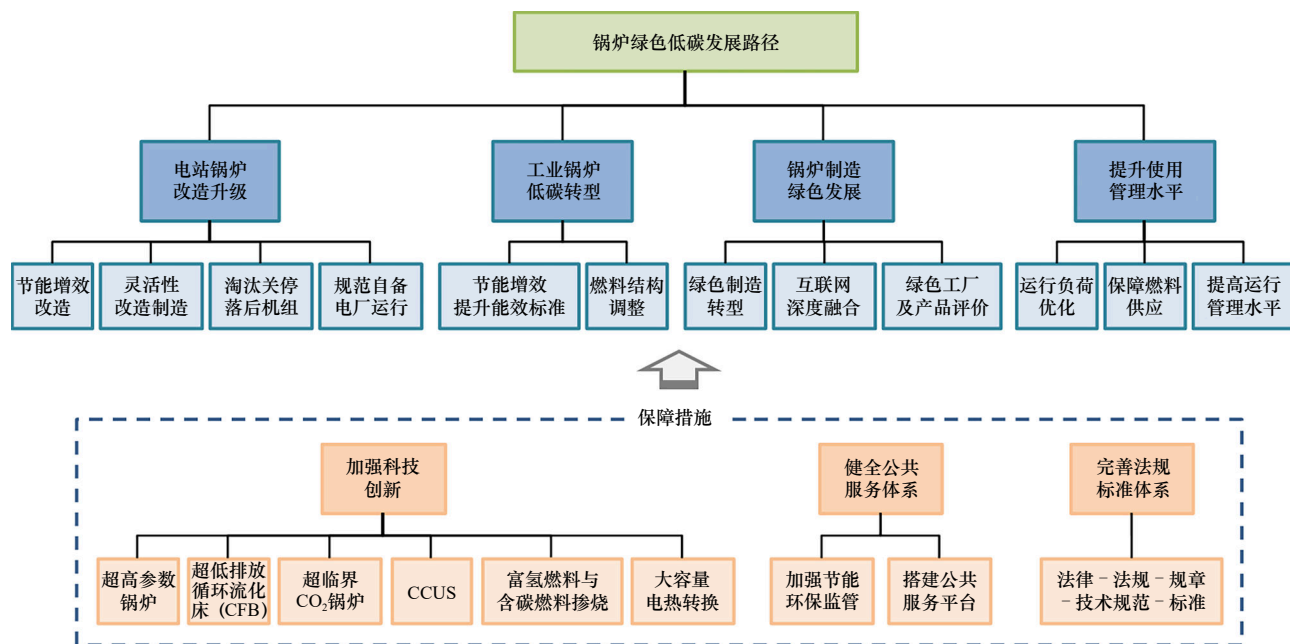


图8 锅炉绿色低碳发展路径

厂 660 MW 发电机组实现了 10% 额定负荷的稳定运行。“十四五”期间，预计完成  $2 \times 10^8$  kW 存量煤电机组灵活性改造，实现  $1.5 \times 10^8$  kW 煤电机组灵活制造规模。

进一步淘汰落后电站锅炉产能。对于电站锅炉存量较大的地区，如山东、江苏、广东、内蒙古等地，淘汰煤电落后产能工作力度将继续加大，低参数小容量电站锅炉将进一步淘汰关停，煤电产业结构将持续向大容量、高参数优化调整；符合能效、环保、安全等政策和标准要求的淘汰关停机组，将纳入应急备用。“十四五”期间，全国将形成并保持  $1.5 \times 10^7$  kW 的应急备用能力。

进一步规范燃煤自备电厂运行。全面清理违法违规燃煤自备电厂，引导自备电厂与清洁能源开展替代发电。加大自备煤电机组节能减排力度，其中符合淘汰条件的自备机组应限时实施淘汰关停，对排放和能耗水平偏高的自备机组要实施超低排放和节能改造。

因地制宜发展生物质纯烧发电和生物质耦合发电技术。我国生物质资源可作为能源利用的开发潜力约为  $4.6 \times 10^8$  tce，替代燃煤可实现近  $1.3 \times 10^9$  t 的  $\text{CO}_2$  减排量。山东、广东、江苏是目前生物质发电装机容量较大的省，未来，河南、黑龙江等生物质资源丰富的省将进一步推广和应用生物质纯烧发电、生物质耦合发电技术。生物质纯烧发电技术受限于生物质来源分散以及单机规模小、单位千瓦投资高等因素，发电成本较高；生物质耦合发电技术的支持政策尚不明朗，随着生物质能电量计量问题的解决，有望取得一定范围应用。

## 2. 工业锅炉低碳转型

持续推动工业锅炉燃料结构调整，实现碳排放源头消减。燃煤工业锅炉数量将进一步下降，燃气锅炉持续增加，生物质、燃煤耦合生物质技术将被广泛应用。与电站锅炉相比，工业锅炉燃料消耗量小、参数低，不存在燃料来源困难、高温条件下粘污腐蚀严重等问题，因此，生物质资源在工业锅炉领域的应用前景更为广阔。如图 4 所示，自 2015 年起，生物质已成为除天然气外锅炉定型产品测试数量最多的工业锅炉燃料类型，这也印证了未来在工业锅炉领域继续推广生物质纯烧、耦合燃烧的巨大潜力。同时，工业锅炉的低碳转型还应与储能技术协同发展，如将氢气掺（混）入天然气中，利用成

熟的天然气管网实现氢气的大规模运输 [16,17]。若工业天然气消耗量可实现 10% 的氢燃料替代，每年可减少  $\text{CO}_2$  排放超  $2 \times 10^7$  t。此外，电能在终端能源消费结构中的比重将持续上升，预计在 2025 年将提高至 30%，超过煤炭成为最主要的终端用能品种 [18,19]；2050 年将进一步提升至 55% [10]。基于工业终端电气化的发展需求和以新能源为主的电力供应体系下的峰谷用电调节需求，电加热锅炉，特别是蓄热式工业电锅炉，在工业锅炉中的占比将持续上升，锅炉容量也将不断增大。随着电力系统逐步脱碳，电热锅炉的减碳作用将日益凸显。

进一步提升工业锅炉能效水平，实现碳排放过程控制。通过修订工业锅炉能效限定值及能效等级等强制性标准，提高锅炉节能环保准入门槛；发布高效锅炉推广目录，推广高效锅炉产品。推进老旧低效锅炉淘汰改造工作，并防止已淘汰锅炉重新进入市场。若通过节能增效，进一步提高工业锅炉平均运行效率约 5 个百分点，每年最多可减少  $\text{CO}_2$  排放约  $8 \times 10^7$  t。

## 3. 锅炉制造绿色发展

锅炉生产制造过程要实施绿色制造转型。锅炉制造企业在保证产品功能、质量和成本的前提下，要综合考虑制造系统的环境影响和资源效率，使产品从设计、制造、使用到报废的整个生命周期实现环境污染最小化，对生态环境无害或危害极小，提高资源利用率，降低能源消耗、碳及污染物排放。锅炉的绿色制造包括绿色设计、清洁生产、绿色物流、绿色运维和再利用 5 个部分。

加强与互联网的深度融合。在制造业转型升级及智能制造快速发展的背景下，锅炉制造企业应加快实施“互联网+”制造业示范项目，开展生产线自动化、智能化改造，提高自动化水平。

积极开展绿色工厂、绿色产品评价。锅炉制造企业应及时通过第三方评价查找不足并进行提高，实现企业自身节能减排和绿色低碳转型；建立产品数据库，跟踪产品，定期开展问题诊断，提出有针对性的节能降碳、污染物减排建议。

## 4. 提升锅炉使用管理水平

锅炉使用过程中影响能效水平的因素主要包括运行负荷、燃料特性、运行管理水平等。一是提高电网调度及工业热用户需求匹配的灵活性和智能化水平，充分发挥大容量高参数锅炉的清洁高效优势

和负荷侧调节能力，尽可能使锅炉在能效水平较高的负荷下运行。二是保障燃煤锅炉的燃料供应。确保电站锅炉燃用设计煤种，工业锅炉尽可能燃用设计煤种，最大限度避免因燃料品质波动导致的锅炉能效下降。三是鼓励使用单位采用专业化运营模式，科学制定优化运行方案，实现锅炉全工况运行优化。四是提高锅炉能效排放在线检测监测与诊断水平，通过智能运维和远程诊断等技术，实现锅炉数字化智能运行。

对于自备电站锅炉，需加强监管，确保自备电厂严格执行公用燃煤电厂的最新大气污染物排放标准和总量控制要求。对于工业锅炉，需提高法规标准要求，辅助税收优惠政策，动态调整行业的对标指标体系，开展锅炉系统能效“领跑者”行动，鼓励和引导在用锅炉进行能效对标，支持效率低、排放高的锅炉按计划实施节能减污和降碳改造。

## 四、保障措施

### （一）加强科技创新

构建“产学研用”协同创新体系。围绕共性关键技术和“卡脖子”难题，加快锅炉节能、减污、降碳关键技术及产品研发和集成创新，形成具有自主知识产权的锅炉节能减排先进技术和成套装备。

一是加快超高参数超超临界燃煤发电技术的研究。该技术是实现煤电机组节能减排的重要技术，其关键制约因素在于热部件材料。650℃发电机组可实现的净效率不低于47%，但所需耐热材料尚未完全成熟，仍需突破高温部件应用的同种/异种焊接、冷热加工和热处理等关键技术；700℃超超临界发电技术的效率可达50%以上[20]，被认为是面向2035年最主要的洁净煤前沿技术之一[21]，其高温合金材料及关键高温部件的制造、加工、焊接、检验等还需进一步研究。

二是进一步突破CFB发电技术。该技术能够解决高硫无烟煤、高水分褐煤、低热值煤的清洁高效利用和低负荷稳燃问题[22]，将在消纳劣质燃料、调峰、生物质利用方面发挥重要作用。“十四五”期间，应进一步开展CFB锅炉炉内石灰石深度脱硫及NO<sub>x</sub>超低排放机理、大型CFB锅炉物料流态等优化设计研究，突破高效、低成本的超低排放CFB锅炉发电关键技术[23]。

三是研发超临界二氧化碳发电技术。超临界二氧化碳循环发电可以利用煤炭、天然气、核能、太阳能、生物质和余热等多种能源形式作为热源，在600℃等级，超临界二氧化碳循环燃煤发电机组供电效率可比传统水循环发电机组提高3~5个百分点[11]。未来，还需进一步加强超临界二氧化碳锅炉关键技术、机组系统集成优化等的研究和工程应用。

四是促进CCUS技术的研发、推广与应用。对于煤基工业和燃煤发电行业，其脱碳过程需要CCUS技术的配合。目前，CO<sub>2</sub>捕集技术普遍存在总体规模偏小、捕集能耗和成本较高等问题[24,25]。为此，今后要加强CO<sub>2</sub>高效低能耗捕集、规模化输送与封存、封存监测与泄漏预警、增压富氧燃烧、CO<sub>2</sub>采油/气/水/热等前沿技术研发。预计2030年煤电CCUS技术的碳捕集规模可达3.7×10<sup>7</sup> t/a[2]。

五是加强氢、氨等富氢燃料与含碳燃料掺烧关键技术研究。目前关于掺氢天然气燃烧特性的影响研究主要集中于内燃机、燃气灶具和燃气轮机[26~29]，掺氢天然气燃烧在工业锅炉领域的应用研究相对比较薄弱，亟需开展不同掺混比例燃气的高效清洁燃烧技术及设备兼容性研究，为大规模天然气管道掺氢应用奠定技术基础。氨、天然气掺混燃烧及氢/氨、煤气固两相掺混燃烧关键技术研究及工程应用也是科技创新方向之一。

六是加强大容量电热转换关键技术的研发。目前，电热锅炉以小容量电阻锅炉为主，采用380V低压供电，单台容量一般不超过2.8MW；而电极锅炉不受电热元件结构布置及发热密度的限制，更适合于大型化，通常采用6kV以上高压供电。但针对大容量电热转换技术的基础研究与关键技术研发尚不充分，仍缺乏相关规范、标准，在实际应用中还存在一定安全隐患[30]。因此，还需加强大容量高压电极锅炉电热转换关键技术、电气安全要求、高效低成本蓄热技术等方面的研究。

### （二）健全公共服务体系

一是整合多方资源，构建“产学研用”交流平台。为有效支撑锅炉行业的绿色低碳发展，需汇聚技术、人才、信息、政策、资金等多方面要素，整合政府、企业、专业服务机构、行业协会、科研院所等各方资源，构建面向产业、企业的公共服务体

系。建议组建锅炉绿色低碳相关领域的“产学研”交流合作和技术推广平台,发挥沟通协调和引领作用,助力锅炉装备的绿色低碳发展。

二是切实做好锅炉安全、节能、环保“三位一体”监督保障工作。针对电站锅炉节能增效改造,开展监督检验和改造前后的能效排放测试;积极响应电力深度调峰需求,开展安全风险评估及防控;做好应急备用锅炉评审与检验,确保可发挥应急备用电源作用;加强自备煤电机组锅炉节能环保监管,推进能效排放测试。针对工业锅炉,做好锅炉设计文件节能审查、锅炉定型产品能效测试和在用锅炉能效定期测试工作,支撑锅炉设计、生产和使用全过程节能监管。

三是强化锅炉全生命周期管理与服务。锅炉制造企业逐步向“设计+制造+安装+维护”的一体化服务发展,提升供给体系对需求的适配性,搭建运营与管控数字化平台,实现锅炉全生命周期管理,为终端用户提供增值服务。具备条件的第三方机构也可为锅炉使用单位提供全过程咨询、维保、改造、专业化运营等服务。

四是提升锅炉碳排放相关检测与评价能力。研发锅炉温室气体排放检测、全生命周期碳足迹量化与评价技术,探索研究锅炉节能减污降碳协同检测与评价体系,搭建锅炉绿色低碳公共服务平台,为锅炉生产和使用单位提供碳排放检测以及碳足迹核算等服务。

### (三) 完善相关法规与标准体系

按照我国特种设备法规标准体系“法律—行政法规—部门规章—安全技术规范—引用标准”的结构层次,完善锅炉相关法规标准体系。适时修订《中华人民共和国特种设备安全法》《中华人民共和国节约能源法》《中华人民共和国大气污染防治法》《特种设备安全监察条例》《高耗能特种设备节能监督管理办法》等,构建有利于锅炉绿色低碳发展的法律法规体系;适时在《锅炉节能环保技术规程》等相关的技术规范中,增加绿色制造、锅炉全生命周期碳排放评价等内容;加快制定锅炉碳排放量化与评价方法等标准,修订锅炉热效率指标、锅炉系统能效指标、锅炉能效测试方法,进一步完善智能制造、绿色制造等标准体系,探索建立锅炉智能化运行及监管信息化标准体系,加快质量安全标准与

国际标准接轨。

鼓励锅炉生产企业和使用单位主导或参与制定/修订相关国家、地方、行业技术标准,结合实际情况,制定企业标准和团体标准,将拥有自主知识产权的关键技术纳入企业标准或团体标准,促进技术创新、标准研制和产业化协调发展。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** April 22, 2022; **Revised date:** June 14, 2022

**Corresponding author:** Liu Xuemin is a senior engineer from China Special Equipment Inspection and Research Institute. Her major research fields include boiler energy efficiency testing and evaluation and energy saving and emission reduction. E-mail: liuxuemin@csei.org.cn

#### 参考文献

- [1] 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 X B, Zheng D D, Yang K, 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): 21–32.
- [2] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1–14.  
Shu Y B, Zhang L Y, Zhang Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1–14.
- [3] 马双忱, 杨鹏威, 王放放, 等. “双碳”目标下传统火电面临的挑战与对策 [J]. 华电技术, 2021, 43(12): 36–45.  
Ma S C, Yang P W, Wang F F, et al. Challenges and countermeasures of traditional thermal power under the goals of carbon neutrality and carbon peaking [J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 36–45.
- [4] 秦光勇, 赵国凌, 王少静. 工业锅炉碳排放计算与降碳举措评价 [J]. 工业锅炉, 2014 (5): 22–27.  
Qin G Y, Zhao G L, Wang S J. Carbon emission measurements and carbon reduction solutions assessment for industrial boilers [J]. Industrial Boilers, 2014 (5): 22–27.
- [5] 电力规划设计总院. 中国低碳化发电技术创新发展年度报告 [R]. 北京: 人民日报出版社, 2020.  
China Electric Power Planning & Engineering Institute. Annual report on China low-carbon power generation technology innovation and development [R]. Beijing: People's Daily Press, 2020.
- [6] 王月明, 牟春华, 姚明宇, 等. 二次再热技术发展与应用现状 [J]. 热力发电, 2017, 46(8): 1–10.  
Wang Y M, Mu C H, Yao M Y, et al. Review of the development and application of double-reheat power generation technology [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 1–10.
- [7] 杨勇平. 燃煤发电系统能源高效清洁利用的基础研究综述 [J]. 发电技术, 2019, 40(4): 308–315.  
Yang Y P. Review of basic research on energy clean and efficient



- utilization in coal-fired power systems [J]. *Power Generation Technology*, 2019, 40(4): 308–315.
- [8] 邓清华, 胡乐豪, 李军, 等. 大型发电技术发展现状及趋势 [J]. *热力透平*, 2019, 48(3): 175–181.  
Deng Q H, Hu L H, Li J, et al. State-of-art and tendency on technologies of large electric power generation [J]. *Thermal Turbine*, 2019, 48(3): 175–181.
- [9] 于国强, 刘克天, 胡尊民, 等. 火电机组参与深度调峰对电网频率特性的影响研究 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(8): 1124–1129.  
Yu G Q, Liu K T, Hu Z M, et al. Study on the influence of thermal power units participating in deep peak load regulation on grid frequency characteristics [J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(8): 1124–1129.
- [10] 赵兵, 景杰. “碳达峰、碳中和”目标下火力发电行业的转型与发展 [J]. *节能与环保*, 2021 (5): 32–33.  
Zhao B, Jing J. Transformation and development of thermal power industry under the goal of “carbon peaking and carbon neutralization” [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2021 (5): 32–33.
- [11] 王月明, 姚明宇, 张一帆, 等. 煤电的低碳化发展路径研究 [J]. *热力发电*, 2022, 51(1): 11–20.  
Wang Y M, Yao M Y, Zhang Y F, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation [J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(1): 11–20.
- [12] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6245–6258.  
Li H, Liu D, Yao D Y. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6245–6258.
- [13] 徐天元, 刘尹华, 李海强, 等. 国内外“碳达峰、碳中和”发展布局分析 [J]. *东北电力技术*, 2021, 42(11): 24–25.  
Xu T Y, Liu Y H, Li H Q, et al. Analysis of development layout of “carbon peak, carbon neutral” at home and abroad [J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2021, 42(11): 24–25.
- [14] 张显荣, 徐玉杰, 杨立军, 等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1565–1578.  
Zhang X R, Xu Y J, Yang L J, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermal power-heat storage coupling systems [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1565–1578.
- [15] 王辉, 李峻, 祝培旺, 等. 应用于火电机组深度调峰的百兆瓦级熔盐储能技术 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1760–1767.  
Wang H, Li J, Zhu P W, et al. Hundred-megawatt molten salt heat storage system for deep peak shaving of thermal power plant [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1760–1767.
- [16] 赵永志, 蒙波, 陈霖新, 等. 氢能源的利用现状分析 [J]. *化工进展*, 2015, 34(9): 3248–3255.  
Zhao Y Z, Meng B, Chen L X, et al. Utilization status of hydrogen energy [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(9): 3248–3255.
- [17] 曹蕃, 陈坤洋, 郭婷婷, 等. 氢能产业发展技术路径研究 [J]. *分布式能源*, 2020, 5(1): 1–8.  
Cao F, Chen K Y, Guo T T, et al. Research on technological path of hydrogen energy industry development [J]. *Distributed Energy*, 2020, 5(1): 1–8.
- [18] 张宁, 邢璐, 鲁刚. 我国中长期能源电力转型发展展望与挑战 [J]. *中国电力企业管理*, 2018 (13): 58–63.  
Zhang N, Xing L, Lu G. Prospects and challenges of medium and long-term energy and power transformation and development in China [J]. *China Power Enterprise Management*, 2018 (13): 58–63.
- [19] 张运洲, 鲁刚, 王芑, 等. 能源安全新战略下能源清洁化率和终端电气化率提升路径分析 [J]. *中国电力*, 2020, 53(2): 1–8.  
Zhang Y Z, Lu G, Wang P, et al. Analysis on the improvement path of non-fossil energy consumption proportion and terminal electrification rate under the new energy security strategy [J]. *Electric Power*, 2020, 53(2): 1–8.
- [20] 徐炯, 周一工. 700 °C 高效超超临界火力发电技术发展的概述 [J]. *上海电气技术*, 2012, 5(2): 50–54.  
Xu J, Zhou Y G. Overview of the development of 700 °C USC technique [J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2012, 5 (2): 50–54.
- [21] 孙旭东, 张博, 彭苏萍. 我国洁净煤技术 2035 发展趋势与战略对策研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(3): 132–140.  
Sun X D, Zhang B, Peng S P. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035 [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 132–140.
- [22] 彭中, 杨光兰, 鄂万竹. 600 MW 超临界 CFB 机组深度调峰运行技术 [J]. *能源科技*, 2020, 18(1): 55–58.  
Peng Z, Yang G L, Wu W Z. 600 MW supercritical CFB units deep peak-regulating operation technology [J]. *Energy Science and Technology*, 2020, 18(1): 55–58.
- [23] 中国电力报. 科技创新规划解读 | 岳光溪: 碳达峰碳中和目标下对先进燃煤发电及科技创新的再认识 [EB/OL]. (2022-04-08) [2022-04-18]. [https://k.sina.com.cn/article\\_2343698037\\_8bb1fe75019011dk8.html](https://k.sina.com.cn/article_2343698037_8bb1fe75019011dk8.html).  
China Electric Power News. Interpretation of the scientific and technological innovation planning—Yue G X: Re-understanding of advanced coal-fired power generation and scientific and technological innovation under carbon peak and carbon neutrality target [EB/OL]. (2022-04-08)[2022-04-18]. [https://k.sina.com.cn/article\\_2343698037\\_8bb1fe75019011dk8.html](https://k.sina.com.cn/article_2343698037_8bb1fe75019011dk8.html).
- [24] 韩学义. 电力行业二氧化碳捕集、利用与封存现状与展望 [J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(2): 110–117.  
Han X Y. Current situation and prospect of carbon dioxide capture, utilization and storage in electric power industry [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2020, 38(2): 110–117.
- [25] 陆诗建, 黄凤敏, 李清方, 等. 燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集技术与工程进展 [J]. *现代化工*, 2015, 35(6): 48–52.  
Lu S J, Huang F M, Li Q F, et al. Advances in technology and project of post-combustion CO<sub>2</sub> capture [J]. *Modern Chemical Industry*, 2015, 35(6): 48–52.
- [26] 王金华, 黄佐华, 刘兵, 等. 喷射时刻和掺氢比对直喷发动机燃烧特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(7): 767–770.  
Wang J H, Huang Z H, Liu B, et al. Effect of fuel injection timings and hydrogen fraction on combustion characteristics of direct-injection engine [J]. *Journal of Xi’an Jiaotong University*, 2006, 40(7): 767–770.

- [27] 马向阳, 黄小美, 吴嫦. 天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性的影响研究 [J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1746–1751.  
Ma X Y, Huang X M, Wu C. Study on the influence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(12): 1746–1751.
- [28] Zhao Y, Mcdonell V, Samuelsen S. Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(47): 26049–26062.
- [29] 张杨鑫, 王志宁, 方明洋, 等. 掺氢天然气应用进展 [C]. 杭州: 中国动力工程学会锅炉专业委员会 2021 年学术研讨会, 2021.  
Zhang Y X, Wang Z N, Fang M Y, et al. Application progress of hydrogen-blended natural gas [C]. Hangzhou: 2021 Symposium of Boiler Committee of Chinese Society of Power Engineering, 2021.
- [30] 李永红, 豆永飞. 电极式电热锅炉及设计文件鉴定中问题及对策 [J]. 甘肃科技, 2021, 37(2): 31–34.  
Li Y H, Dou Y F. Problems and countermeasures of electrode boiler and appraisal of design documents [J]. Gansu Science and Technology, 2021, 37(2): 31–34.