

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.03.011

国内外生物质能源发电技术应用进展

Development of biomass power generation technology at home and abroad

张东旺^{1,2}, 范浩东^{1,4}, 赵冰³, 王家林³, 巩太义³, 张缙^{2*}, 李诗媛¹, 杨海瑞², 吕俊复²
ZHANG Dongwang^{1,2}, FAN Haodong^{1,4}, ZHAO Bing³, WANG Jialin³, GONG Taiyi³,
ZHANG Man^{2*}, LI Shiyuan¹, YANG Hairui², LYU Junfu²

(1.北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083; 2.清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084; 3.华电国际电力股份有限公司天津开发区分公司, 天津 300270; 4.太原理工大学 电气与动力工程学院, 太原 030024)
(1.School of Energy and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2.Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3.Tianjin Huadian International Power Development Company Limited, Tianjin 300270, China; 4.College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

摘要: 生物质能源是可再生清洁能源, 对节能减排具有重要意义。生物质发电不仅能实现“碳中和”, 在我国实现“碳达峰”后还可替代部分煤电, 成为电网调峰的重要力量。分析了生物质燃烧特性, 分别介绍了国内外纯燃生物质发电、生物质与煤混烧发电和生物质气化耦合燃煤锅炉的应用现状。指出生物质纯燃发电项目容量小, 发电效率不高且易出现积灰和氯腐蚀的问题, 机组可用率偏低。生物质与煤混烧技术可以利用现有大容量发电机组, 需要的额外投资小, 具有较高的灵活性, 可有效提高生物质利用效率, 避免纯燃带来的一系列问题, 是现阶段更经济可行的发电方案。目前, 生物质与煤混烧发电项目的建设和运营需要上网电价的政策支持。

关键词: 生物质能源; 纯燃; 混烧; 燃煤耦合生物质发电; 循环流化床; 碳达峰; 碳中和; 零碳; 超低排放

中图分类号: TK 6; TM 619 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)03-0070-06

Abstract: Biomass energy is a renewable and clean energy, which is of great significance for energy conservation and emission reduction. Biomass power generation can not only achieve carbon neutralization, but also replace some coal power after achieving carbon peak in China, which has become an important force in peak shaving of power grid. The combustion characteristics of biomass were analyzed, and the applications of pure biomass combustion for power generation, co-firing of biomass and coal for power generation, and biomass gasification coupled with coal in China and abroad were introduced respectively. It is pointed out that the capacity, efficiency and availability of pure biomass combustion units are insufficient, and the ash deposition and chlorine corrosion are prone to occur. The biomass and coal co-combustion technology can make use of the existing large-capacity power generating units with a little additional investment, and bring in high flexibility and improvement on biomass utilization efficiency. It is an economical and feasible power generation scheme at this stage, since it can avoid a series of problems caused by pure combustion. But the construction and operation of biomass and coal co-firing power generation projects will be difficult without policy support on electricity price.

Keywords: biomass energy; pure combustion; co-combustion; co-firing of coal and biomass for power generation; circulating fluidized bed; carbon peak; carbon neutrality; zero carbon; ultra-low pollutants emission

0 引言

2020年我国电力行业的CO₂排放量占能源行业排放总量近50%, 电力行业减排进程直接影响“碳达峰”“碳中和”整体进程。要实现“碳达峰”和“碳中

和”, 一方面要逐步减少化石能源的消费量, 同时要切实提升可再生能源的消费占比。

生物质能源作为可再生清洁能源, 同时也是仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源, 约占世界能源消费的10.0%^[1-2]。20世纪70年代, 北欧国家开始探索乙醇等生物质能源^[3]; 1993年, 日本重启“阳光计划”, 发展可再生能源; 2000年, 欧盟制定了《针对能源供应安全的欧洲政策》^[4], 鼓励发展生物

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-01-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0600203); 中国华电集团科技项目(CHDKJ19-01-88)

质燃料;2013年,印度提出将非常规能源翻番。

根据中国工程院《中国可再生能源发展战略研究报告》,我国含太阳能在内每年开采的清洁能源总量折合 21.48 亿 t 标准煤。其中,生物质能源占 54.5%,是水电的 2.0 倍和风电的 3.5 倍^[5],是我国最具发展潜力的可再生能源。

1 生物质纯燃发电技术

1.1 生物质能源热利用技术简介

生物质能源是现阶段唯一的可再生碳能源,燃烧是将生物质能源洁净化利用的高效途径。生物质能源依据来源的不同可分为林业废弃物、农业废弃物、城镇垃圾和工业有机废弃物等。生物质能源热利用技术包括物理化学法、热化学法、生物化学法,如图 1 所示^[6]。其中,生物质能源直燃发电技术分为纯燃生物质和与煤混烧 2 种,可以实现生物质能源的规模化高效利用,该技术从基础研究到工程应用正逐步发展完善。

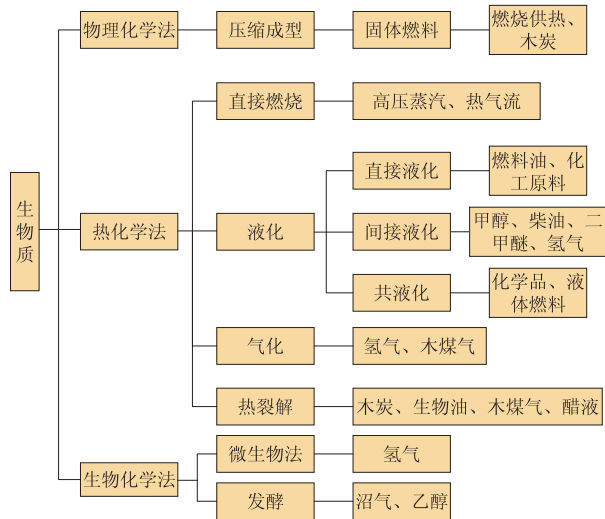


图 1 生物质能源热利用技术
Fig. 1 Heat utilization technology of biomass energy

1.2 生物质燃料燃烧特点

生物质燃料挥发成分含量高、易燃烧,其燃烧后 CO₂净排放率为 0,NO_x排放量仅为煤的 1/5,SO₂排放量仅为煤的 1/10。生物质燃料中 N、S 元素含量少,但 K、Cl 等无机杂质含量较高,在直燃过程中会导致锅炉内结渣、受热面灰沉积、低温受热面氯腐蚀、过热器管高温腐蚀等问题,尤其在提高生物质纯燃电厂的发电参数以提高整体发电效率时,由过热器表面沉积引发的高温腐蚀问题将严重影响电厂正常运行^[7-8],受热面壁温与金属腐蚀速度关系如图 2 所示。

灰沉积会引起受热面磨损、腐蚀,并可能导致发电量减小,甚至非计划停炉。尽管可以使用吹灰

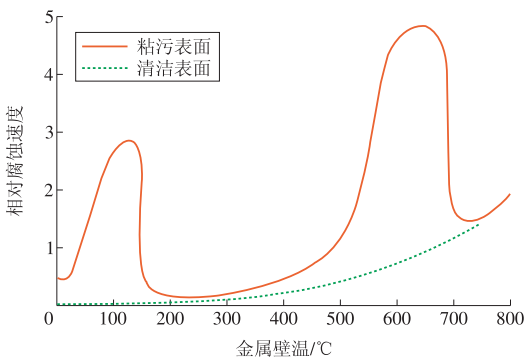


图 2 受热面壁温与金属腐蚀速度关系曲线
Fig. 2 Relationship curve between heating surface temperature and metal corrosion rate

来控制沉积,但在清洗设备难以到达的位置仍可能发生不受控制的沉积^[9]。由于积灰的传热系数是钢材的 1/40,当积灰严重时甚至会导致管道爆裂,直接威胁锅炉的运行安全。灰沉积问题的解决方法在世界范围内受到广泛关注,图 3 为 Web of Science 网站检索到的近 5 年灰沉积主题论文发表情况,可见近几年我国对灰沉积问题进行了较多的研究,然而目前的研究成果还不能完全解决灰沉积问题^[10]。

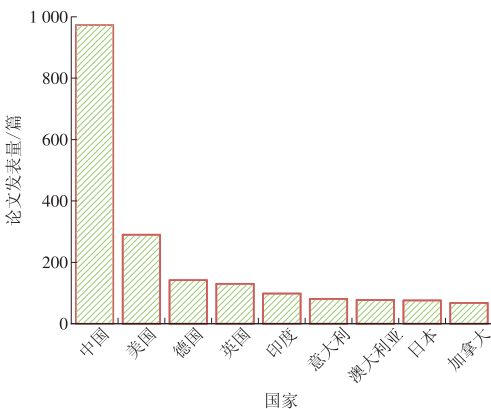


图 3 近 5 年灰沉积主题论文发表量
Fig. 3 Number of published papers on ash deposition in recent 5 years

1.3 国外生物质纯燃发电技术发展现状

由于能源结构不同,国外特别是欧洲国家对生物质纯燃发电技术的研发早于我国。有代表性的生物质锅炉公司,其燃烧技术及应用情况如下。

丹麦 BWE 公司率先研发出秸秆燃烧发电技术。在这家能源研发企业的技术支撑下,第 1 座秸秆生物燃烧发电厂于 1998 年在丹麦 Haslev 诞生,功率为 5.0 MW^[11]。目前,丹麦已建成了 130 家秸秆发电厂,还有一些燃烧木屑或垃圾的发电厂也能兼烧秸秆。锅炉炉型主要有振动炉排炉和喷粉室燃炉。与喷粉室燃炉相比,炉排炉系统结构简单、易操作、燃烧温度控制方便,可以缓解积灰结渣现象,投资相对较低。英国 Elyan 的生物质燃烧发电厂曾是世

世界上最大的秸秆发电厂,装机容量 38.0 MW^[12],该电厂同样采用了 BWE 公司的生物质燃烧发电技术。

美国 Foster Wheeler 公司生物质循环流化床(CFB)锅炉技术,机组发电功率为 3.0~47.0 MW。其生物质燃料主要为木材加工废料、造纸业废弃物等,废弃物的最高含水量可达 60.0%,排烟温度为 140 ℃,锅炉热效率达 88.0%^[13]。2005 年初,Foster Wheeler 公司与 Semb Corp Utilities UK Limited 签订协议,为后者以木头作为燃料的 30.0 MW 发电机组提供鼓泡流化床锅炉。

日本的 Takuma 公司在日本和海外共计销售了 500 多台发电或供热蒸汽锅炉,使用的燃料主要是木屑、甘蔗渣、谷物的残余物等。

比利时布鲁塞尔温克能源技术公司,早在 20 世纪 20~30 年代就开始进行燃烧秸秆锅炉的设计和制造,是世界上最早使用生物质作为燃料的锅炉公司之一。锅炉的燃料主要是木材废弃物,木质建筑废弃物,造纸废弃物及城市垃圾等。该公司的倾斜式液压移动炉排炉,热效率可达 85.0%,更适合用于 20.0 MW 以下的生物质燃烧发电机组。

Bobcock & Wilcox 公司的产品包括炉排炉和 CFB 锅炉。通用电力公司采用的燃烧方式为 CFB 燃烧,在加利福尼亚建造了许多纯燃生物质的发电站,容量都在 2.5 MW 左右。

1.4 国内纯燃生物发电技术发展现状

我国是世界上最大的能源消费国,为了减少碳排放、实现低碳发展,我国在能源结构调整中优先发展可再生能源,其中生物质能源以其多种天然优势成为可再生能源发展的重点。2006 年,山东单县采用丹麦 BWE 公司生物质炉排炉技术的 30.0 MW 小型生物质纯燃发电系统建成,配有 1 台 130 t/h 的振动炉排高压锅炉^[14]。我国的生物质燃烧发电总装机容量从 2016 年的 12.1 GW 增长到 2019 年的 22.5 GW,连续 3 年增幅超 20.0%,提前完成“十三五”规划中对于生物质发电总装机容量的要求。

在生物质纯燃发电技术的发展过程中,CFB 由于具有燃料适应性广、污染物排放低的优点,同时考虑到机组建设投资,新建机组普遍采用了 CFB 燃烧方式。截至 2020 年 4 月,我国纯燃生物质机组数量近 440 台,其中 CFB 机组 336 台。2010 年以后,纯燃生物质机组向着大容量、高参数方向发展。具有里程碑意义的几个项目包括:2011 年,广东湛江 50.0 MW 生物质 CFB 锅炉发电机组投入运行;2016 年,国内设计制造的世界首台 125.0 MW 生物质 CFB 锅炉在泰国投入运行。2019 年以来,大量的超高压一次再热生物质 CFB 锅炉已经得到广泛的工

业应用。目前,超高压一次再热 80.0 MW 生物质流化床机组正在安装调试。

欧洲生物质燃料以林业废弃物为主,而我国生物质燃料以农业废弃物为主,在燃烧工程中更容易出现积灰结渣以及腐蚀等问题。随着生物质纯燃发电行业需求的不断发展,国内具备相应设备设计制造能力的企业逐渐增多。无论在装机容量还是在机组参数上,中国生物质 CFB 纯燃技术已经具备世界先进水平。

1.5 目前存在的问题

1.5.1 发电项目现金流压力

生物质纯燃发电技术在我国具有很大的发展空间,但在整个行业中仍存在诸多制约因素,其中最突出的是纯燃生物质发电项目商业模式存在较大的现金流压力。一方面,生物质燃料成本高,且供应受季节性等因素影响,价格波动较大。另一方面,可再生能源电价补贴及政府增值税返还政策造成应收账款数额高,且返还时间存在不确定性。

1.5.2 连续运行周期有待加长

尽管国内外学者针对生物质燃料的积灰结渣特性进行了大量的研究,也对锅炉设计进行了相应改善,但运行情况表明,纯燃生物质 CFB 锅炉的连续运行周期依然低于 6 个月。主要原因是床料结渣、回料阀聚团、对流受热面积灰、炉内高温受热面和尾部烟道低温受热面腐蚀等问题,以及生物质具有较大的韧性不易破碎,易造成切割刀头磨损发热。生物质中的杂质和纤维还会造成上料系统和分离器堵塞^[15]。

1.5.3 污染物排放问题

目前我国尚无专门针对纯燃生物质发电机组污染物排放的相关规定,只能参照 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》执行,NO_x和 SO_x排放均要求低于 100 mg/m³。随着对燃煤发电厂污染物排放要求的日益严格,未来纯燃生物质发电厂污染物排放控制也要严格按照燃煤发电厂超低排放标准执行,NO_x低于 50 mg/m³,SO_x低于 35 mg/m³。

生物质燃料中,硫含量较低,而碱金属含量高,其本身具有很好的自脱硫性能。在优化设计的基础上,绝大多数锅炉 SO_x原始排放可以满足超低排放的要求。对个别高硫成分生物质燃料,可采用在炉内添加石灰石的方法脱硫,投资和运行成本较低,也可以轻松实现 SO_x的超低排放。

关于 NO_x排放问题,通过炉内流态调整,强化焦炭颗粒表面局部还原性气氛,并调整一、二次风配比及二次风设置,加大炉内还原性气氛空间,可有效控制 NO_x的原始生成。在此基础上,增设非选择

性催化还原(SNCR)法进一步降低氮氧化物排放,可以实现超低排放。

无论是脱硫还是脱氮,为进一步达到超低排放的要求,都需要增加一定的投资和运行成本。纯然生物质电厂的发电成本进一步提高,在政策补贴不到位的情况下,增加了电厂的生存难度。

2 生物质混烧技术

2.1 技术优势

由于生物质能源的区域性,纯燃生物质电厂规模很难做大。此外,考虑到生物质燃烧时产生的高温腐蚀问题,蒸汽参数提高受到限制,纯燃生物质电厂热效率较低。如果能够利用燃煤电厂现有锅炉、汽轮机及辅助系统,用生物质燃料替代部分煤作为锅炉燃料,可极大降低生物质纯燃发电的初期投资。相关研究表明,处理相同数量的生物质燃料,可以节省约50.0%的初期投资。此外,在运的燃煤锅炉机组参数均较高,供电效率一般在40.0%左右。依托高效煤电机组,相较于纯燃生物质电厂,供电效率可提升约10.0%^[16]。

生物质混烧技术最突出的优势是当生物质与煤混烧时,生物质燃料碱金属和Cl的含量通过煤的加入得到稀释,锅炉运行中出现的积灰结渣等一系列问题可以得到有效解决,锅炉可用率可以达到燃煤锅炉的水平。

由于燃煤耦合生物质发电具有上述诸多优越性,在全世界范围得到广泛应用,一些国家生物质发电量占总发电量的比例高达15.0%~20.0%。

2.2 国外生物质混烧应用现状

目前,欧盟国家在法规政策和技术方面采取各种措施降低燃煤发电的CO₂排放,其中主要的一项技术措施就是燃煤耦合生物质发电。有了碳减排的具体指标,加上政府促进燃煤耦合生物质发电的政策驱动,30多年来欧盟国家燃煤耦合生物质发电得到很好的推广应用,而且在政策法规及大型燃煤电厂煤与生物质混烧技术方面均取得宝贵经验。

丹麦哥本哈根DONG Energy 2×430.0 MW超临界燃烧多种燃料/生物质电厂,通过混烧多种燃料和生物质,包括专门燃烧秸秆的生物质往复炉排锅炉,每年可燃烧17万t秸秆,产生的超临界参数蒸汽和煤粉炉产生的蒸汽混合发电。同时,在超临界煤粉炉中,混烧废木材成型颗粒,每年可消耗废木材16万t,煤50万t^[17]。

日本已有20座燃煤电厂计划进行生物质混烧发电,总装机容量约为1 GW。2030年生物质发电的政策目标是5 GW。2017年,日本进口了50万t

木颗粒和140万t棕榈仁壳(PKS)。据推测,到2023年,日本木材颗粒进口量将超过500万t^[18]。

Drax电厂是英国最大的火电厂,容量为4 GW,电厂装机包括6×660.0 MW前后墙对冲燃烧锅炉。该电厂生物质混烧改造工程于2008年下半年启动,现在6台锅炉均改造成配备生物质单独磨制的混烧锅炉,是世界上容量最大的采用生物质单独处理、磨制的生物质混烧煤粉炉电厂。该电厂每年用于混烧的生物质为150万t,可减排CO₂ 200万t。改造完成后,同样具有良好的经济效益。2015年该电厂的总收入是26.380亿英镑,其中由于混烧生物质而得到的奖励和上网电价补贴的收入为4.518亿英镑,占总收入的17.0%^[17]。

芬兰Alholmens Kraft 550.0 MW热电厂拥有目前国外生物质与煤混烧容量最大的CFB机组^[19],锅炉蒸发量为702 t/h,蒸汽压力为16.5 MPa,蒸汽温度为545℃,燃料为煤(10.0%),泥煤(45.0%),森林废弃物(10.0%)和工业废木材(35.0%)。

2.3 国内生物质混烧应用现状

国家能源局于2017年年底启动了生物质混烧发电试点工作,2018年6月21日正式公布了该试点项目名单,共有89个项目入选,包括58个农林生物质耦合项目,29个污泥耦合项目和2个垃圾耦合项目。这些项目每年可以消纳751万t农林生物质,处理423万t城市污泥和153万t城市垃圾;每年可以增加生物质电量8 300 GW·h,替代燃煤262万t,减排CO₂ 733万t^[20]。

华电国际十里泉发电厂是国内较早开展生物质混烧的电厂之一,于2005年改造成混烧秸秆发电,折合生物质发电容量26.0 MW。该厂运行数据表明,当秸秆与煤粉的掺混比例低于0.4:1.0时,对整体发电项目影响较小,锅炉尾部受热面没有出现较大的腐蚀、堵塞和磨损等问题^[21]。

污泥处理项目在国内享受国家补贴,目前已有较多的污泥耦合发电项目,如华能莱芜电厂等采用烟气直接干化耦合发电技术^[22],华润电力(常熟)等采用蒸汽间接干化耦合发电技术^[23],通过间接式热干化的方式将城市污泥的含水率从80.0%降至30.0%左右,再与燃煤掺混后送入电厂650.0 MW超临界燃煤发电机组锅炉焚烧,具有处理速度快、减量化程度高、能源再利用等特点。

2017年5月,中国华能集团研发成功一整套300.0 MW固废及生物质与CFB燃煤锅炉直燃耦合发电系统混烧工艺,用于固体废弃物及生物质混烧发电系统示范工程。在福建永安300.0 MW CFB锅炉上实现了生物质及固废混烧比例达到10.0%,锅

炉运行稳定,未出现积灰结渣问题^[24]。

秦皇岛热电厂 300.0 MW CFB 锅炉混烧 10.0% 污泥,锅炉性能参数良好,不但城市污泥得到资源化处置,而且得到市政补贴,减少了电厂运行成本。

由于 CFB 锅炉本身具有燃料适应性广、给料系统简单的优势,目前国内 CFB 燃煤锅炉混烧生物质项目逐渐增多。

2.4 国内外生物质气化耦合煤粉锅炉应用现状

芬兰 Lahti 电厂 200.0 MW CFB 锅炉生物质气化/煤粉炉混烧,于 1998 年开始采用 CFB 气化炉产生生物质煤气,然后将煤气送入煤粉炉中与煤粉炉混烧。电厂容量相当于 200.0 MW,生物质通过气化间接混烧产生相当于 15.0% 的热能输入,混烧后整个电厂的 CO₂ 减排 10.0%。CFB 气化炉的年运行小时数为 7 000 h^[25]。

我国大唐长山热电厂 660.0 MW 超临界煤粉锅炉,采用生物质气化耦合燃煤发电技术。其工作原理是秸秆颗粒在高温高压条件下热解产生 CO、CH₄ 等可燃气,输送至燃煤机组炉膛^[26]。气化炉折合发电功率为 20.0 MW,气化产生燃气热值为 5.551 MJ/kg,气化炉产气率为 1.85 m³/kg,气化效率为 76.14%,厂用电率为 2.24%。但由于机组的初期投资及运行维护成本较高,经济性并不理想。

2.5 生物质与煤混烧在我国的困境

2005 年,我国首个燃煤耦合生物质发电项目山东华电十里泉电厂建成,折合生物质发电容量 26.0 MW。该项目自投产以来已安全稳定运行 10 余年,然而由于生物质发电上网电价补贴不足,生物质燃料价格较高时会产生亏损。2011 年,国电宝鸡第二发电有限责任公司依托 300.0 MW 煤电机组建设燃煤耦合生物质发电项目,由于没有获得生物质发电上网电价补贴,而是实行燃煤标杆上网电价,运行期间亏损严重,目前已停运。2012 年,湖北国电荆门电厂将 640.0 MW 煤电机组改造成燃煤耦合生物质发电项目,折合生物质发电容量 10.8 MW。该项目由于获得了与生物质直燃电厂同等的生物质发电上网电价,自投产以来运营情况良好^[16]。

由此可见,现阶段阻碍燃煤耦合生物质发电的瓶颈,在于能否获得合理的生物质发电上网电价。生物质的收购和储运成本高,导致目前生物质发电成本远高于传统燃煤发电,同时也高于目前的燃煤标杆上网电价。因此,生物质混烧发电项目同纯燃发电项目一样,都需要获得政策上的支持和补贴。

3 结论

生物质发电不仅能实现碳中和,生物质加碳捕

集和封存(BECCS)还可实现负碳排放。更重要的是,在我国实现“碳达峰”后,生物质发电可替代部分煤电,成为电网调峰的重要力量。

分析了生物质燃烧特性,分别介绍了国内外纯燃生物质发电、生物质与煤混烧发电和生物质气化耦合生物质锅炉的应用现状。指出生物质纯燃发电项目容量小,发电效率不高且易出现积灰和氯腐蚀的问题,机组可用率偏低。生物质与煤混烧技术可以利用现有大容量发电机组,需要的额外投资小,具有较高的灵活性,可有效提高生物质利用效率,避免纯燃带来的一系列问题,是现阶段更经济可行的发电方案。目前,生物质与煤混烧发电项目的建设和运营还需要上网电价的政策支持。

参考文献:

- [1] 舟丹. 可再生能源已成全球能源投资热点领域[J]. 中外能源, 2015, 20(3): 98.
- [2] ZHOU Dan. Technologies for recovering low-temperature heat in delayed coking units [J]. Sino-Global Energy, 2015, 20(3): 98.
- [3] BACH Q V, TRINH T N, TRAN K Q, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass torrefied in various atmospheres [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 141: 72-78.
- [4] 石元春. 我国生物质能源发展综述[J]. 智慧电力, 2017, 45(7): 1-5, 42.
- [5] SHI Yuanchun. Overview of biomass energy development in China [J]. Smart Power, 2017, 45(7): 1-5, 42.
- [6] 田冬莲, 张辉, 高海洋. 国外推广应用车用生物燃料的政策措施分析[J]. 客车技术与研究, 2009, 32(2): 58-61.
- [7] TIAN Donglian, ZHANG Hui, GAO Haiyang. Analysis on the policy measures of promoting the application of vehicle biofuels abroad [J]. Bus Technology and Research, 2009, 32(2): 58-61.
- [8] 于雄飞. 带你全面了解生物质发电[J]. 绿色中国, 2018(4): 44-47.
- [9] YU Xiongfei. Bring you comprehensively understand biomass power generation [J]. Green China, 2018(4): 44-47.
- [10] 高荫榆, 雷占兰, 郭磊, 等. 生物质能转化利用技术及其研究进展[J]. 江西科学, 2006, 24(6): 529-533, 544.
- [11] GAO Yinyu, LEI Zhanlan, GUO Lei, et al. The conversion and utilization technology of biomass energy and its research progress [J]. Jiangxi Science, 2006, 24(6): 529-533, 544.
- [12] 骆仲泐, 陈晨, 余春江. 生物质直燃发电锅炉受热面沉积和高温腐蚀研究进展[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(3): 189-198.
- [13] LUO Zhongyang, CHEN Chen, YU Chunjiang. Review of deposition and high-temperature corrosion in biomass-fired

- boilers [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(3): 189-198.
- [8] 白贤祥, 张玉刚. 生活垃圾焚烧厂余热锅炉水冷壁高温腐蚀治理研究[J]. 环境卫生工程, 2018, 26(3): 68-70, 74.
- BAI Xianxiang, ZHANG Yugang. Research on treatment of water-wall high temperature corrosion of waste heat boiler in municipal solid waste incinerator [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018, 26(3): 68-70, 74.
- [9] WANG H, HARB J N. Modeling of ash deposition in large-scale combustion facilities burning pulverized coal [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(3): 267-282.
- [10] KLEINHANS U, WIELAND C, FRANDSEN F J, et al. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 68: 65-168.
- [11] 朱德辉. 天门再生能源环保热电厂工程可行性研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [12] 罗永忠. 秸秆发电商品化前景分析[J]. 中国能源, 2005(3): 43-45.
- LUO Yongzhong. Commercial market analysis of straw fired technology in China [J]. Energy of China, 2005(3): 43-45.
- [13] 董玉平, 郭飞强, 董磊, 等. 生物质热解气化技术[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 44-49.
- DONG Yuping, GUO Feiqiang, DONG Lei, et al. Study on trend of biomass gasification [J]. Engineering Science, 2011, 13(2): 44-49.
- [14] 郑美灵. 生物质发电项目商业化可行性及政策支持研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [15] 姬爱华. 生物质直燃发电特点及问题分析[J]. 科技风, 2012(8): 56.
- JI Aihua. Characteristics and problem analysis of biomass direct combustion power generation [J]. Technology Wind, [15] 2012(8): 56.
- [16] 姜士宏, 胡文平. 燃煤耦合生物质发电需上网电价政策支持[N]. 中国能源报, 2018-07-30(17).
- [17] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电[J]. 分布式能源, 2017, 2(5): 47-54.
- MAO Jianxiong. Co-firing biomass with coal for power generation [J]. Distributed Energy, 2017, 2(5): 47-54.
- [18] JUNGINGER M, KOPPEJAN J, GOH C S. Sustainable bioenergy deployment in east and south east asia: notes on recent trends [J]. Sustainability Science, 2019, 15(3): 1-5.
- [19] Alholmens: the world's largest biofuelled plant [EB/OL]. (2002-01-01) [2021-01-06]. <https://www.modernpowersystems.com/features/featurealholmens-the-world-s-largest-biofuelled-plant-part-1/>.
- [20] 国家能源局, 环境保护部. 关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知[Z]. 国能发电力[2017]75号.
- [21] 周国忠. 生物质掺烧发电存在问题及探讨[J]. 科技视界, 2017(9): 242-243.
- ZHOU Guozhong. Discuss on the problems of biomass co-firing power generation technology [J]. Science & Technology Vision, 2017(9): 242-243.
- [22] 高太振. 污泥在大型燃煤电厂中干化掺烧处理的应用[J]. 企业技术开发, 2013, 32(4): 42-43.
- GAO Taizhen. Sludge drying and blending application in large coal-fired power plant [J]. Technological Development of Enterprise, 2013, 32(4): 42-43.
- [23] 陈大元, 王志超, 李宇航, 等. 燃煤机组耦合污泥发电技术[J]. 热力发电, 2019, 48(4): 15-20.
- CHEN Dayuan, WANG Zhichao, LI Yuhang, et al. Sludge-coupled power generation technology in coal-fired power plant [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(4): 15-20.
- [24] 韩全顺, 谭兴. 300 MW 循环流化床锅炉生物质燃料混烧影响分析[J]. 铁法科技, 2018(2): 45-47.
- HAN Quanshun, TAN Xing. Influence of biomass fuel co-combustion on 300 MW circulating fluidized bed boiler [J]. Tiefsa Keji, 2018(2): 45-47.
- [25] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电超超临界机组较大幅度减排CO₂的可行之路[C]//第十一届超超临界机组技术交流会论文集. 合肥, 2017: 1-38.
- [26] 马喜涛. 大唐长山厂燃煤耦合生物质气化发电技术改造示范项目顺利通过168小时试运行[EB/OL]. (2019-12-23) [2020-12-18]. <http://news.bjx.com.cn/html/20191223/1030581.shtml>.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

张东旺(1996—), 男, 河北定州人, 在读硕士研究生, 从事生物质发电研究工作(E-mail: 18810551680@163.com)。

范浩东(1998—), 男, 山西忻州人, 在读硕士研究生, 从事煤泥流化床清洁燃烧等研究工作。

赵冰(1981—), 男, 山东平原人, 工程师, 从事火力发电工程管理研究工作。

王家林(1974—), 男, 山西山阴人, 助理工程师, 从事热能与动力工程研究工作。

巩太义(1972—), 男, 山东蓬莱人, 工程师, 从事热能与动力工程研究工作。

张曼*(1971—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 副教授, 博士, 从事循环流化床锅炉技术研究工作(E-mail: zhangman@mail.tsinghua.edu.cn)。

李诗媛(1979—), 女, 北京人, 教授, 博士生导师, 从事煤炭清洁高效燃烧研究工作。

杨海瑞(1972—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 从事循环流化床锅炉技术煤燃烧及污染物控制研究工作。

吕俊复(1967—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 从事循环流化床燃烧理论与技术研究工作。