

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.019

生物质气化的分布式冷热电联供系统研究*

关海滨¹ 孙荣峰¹ 闫桂焕^{1,2} 张卫杰¹ 姜建国³ 李晓霞³

(1. 山东省科学院能源研究所, 济南 250014; 2. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061;

3. 山东省生物质气化技术重点实验室, 济南 250014)

【摘要】 阐述了分布式冷热电联供系统的概念及特点,介绍了生物质气化系统的原理,并探讨了生物质气化冷热电联供系统的几种应用形式及各自的优缺点,分析了我国发展生物质气化冷热电联供系统的优势及面临的问题。最后指出生物质气化冷热电联供系统可实现能量的梯级利用,具有良好的社会、经济和环境效益,为高效综合利用我国生物质资源的重要途径之一。

关键词: 生物质 气化 分布式 冷热电联供

中图分类号: TK6; S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0098-07

Distributed CCHP Based on Biomass Gasification

Guan Haibin¹ Sun Rongfeng¹ Yan Guihuan^{1,2} Zhang Weijie¹ Jiang Jianguo³ Li Xiaoxia³

(1. Energy Research Institute, Shandong Academy of Sciences, Ji'nan 250014, China

2. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China

3. Key laboratory for Biomass Gasification Technology of Shandong Province, Ji'nan 250014, China)

Abstract

Definition and characteristics of distributed combined cooling, heating and power system (CCHP) were briefly summarized. The principle of biomass gasification system was mainly introduced, and several application modes of CCHP based on biomass gasification (BGCCHP) were discussed. At last, the advantages and difficulties of developing BGCCHP in China were analyzed. BGCCHP could realize the cascade utilization of energy coming along with social, economic and environmental benefits and it is an efficient and comprehensive way for biomass resource exploitation and application.

Key words Biomass, Gasification, Distribution, Combined cooling, heating and power

引言

以化石燃料为一次能源的传统冷热电联供系统正面临着能源日渐枯竭及环境污染问题的双重压力,及时调整能源结构,积极开发利用新能源和可再生能源已经成为实现能源可持续发展战略的重要途径。

生物质能既是一种洁净的可再生能源,在能量转化中不会产生大量有害的SO₂等污染物,CO₂几乎实现零排放,又是可再生能源中利用最多和最便于

储存的能源,仅次于煤炭、石油、天然气,占世界总能耗的14%,在一些发展中国家甚至占到了90%。

生物质气化是生物质利用的重要技术之一,生物质原料含有70%左右的挥发分,非常适合通过气化技术生成尽量多的可燃气^[1]。经过处理的生物质燃气可用于炊事或发电,以实现生物质能的高效清洁利用。另外,生物质能资源分散,能量密度较低,收集和运输困难,适合建立分布式供能系统对其加以利用。本文将对传统分布式冷热电联供系统以及生物质气化冷热电联供系统的基本原理、特点、应

收稿日期: 2009-12-16 修回日期: 2010-02-05

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA05Z214)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD07A0302)

作者简介: 关海滨,助理研究员,主要从事生物质能综合利用技术开发与应用研究, E-mail: guanhb@sderi.cn

用形式等进行介绍与分析,并针对在我国发展生物质气化冷热电联供系统所具备的优势及面临的问题进行探讨,为生物质能合理高效利用提供参考。

1 分布式冷热电联供系统

1.1 分布式冷热电联供系统的概念

分布式冷热电联供系统(distributed cooling, heating and power system,简称 CCHP)包含两层意思:①分布式,是相对于传统的集中供能方式而言的,是一种将发电及热能回收系统以小规模、分散的方式布置在用户场所,可以独立地供应冷、热和电的供能方式。②冷热电联供,基本原理如图 1 所示,其本质是能量的梯级利用原理。

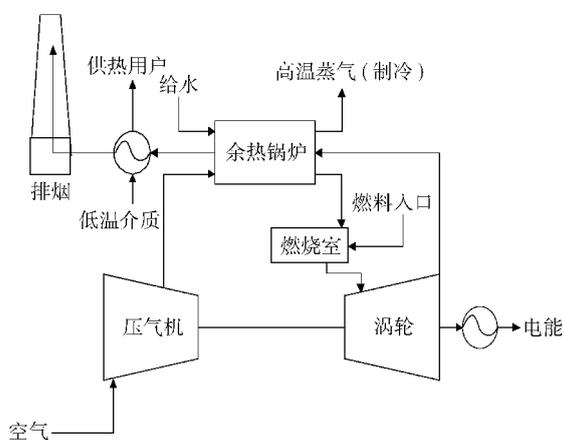


图 1 分布式冷热电联供系统工作流程图

Fig. 1 Sketch of distributed CCHP

燃料和压缩空气同时被送入燃烧室进行混合燃烧,燃烧形成的高温烟气在压力的作用下驱动燃气轮机转子旋转,同时带动与燃气轮机转子同轴连接的发电机转子旋转做功,从而产生电能。高温烟气在燃气轮机内做功后温度和压力降低,其排气温度约为 400°C ,在压力的作用下进入余热锅炉;余热锅炉产生的高温蒸汽进入吸收式制冷机组进行制冷,从余热锅炉出来的蒸汽温度降到 200°C 左右,然后再进入热网水换热器中加热采暖用水;最后,低温烟气排入大气。

通过一次能源的输入同时向用户提供电、热、冷多种形式的能量^[2]。分布式冷热电联供系统实现了能源的梯级利用,极大地提高了能源的利用效率。

1.2 分布式冷热电联供系统特点

1.2.1 能源利用效率高

分布式冷热电联供系统将高品质的电与低品质的冷和热这三种能量需求有效地统一,实现能源的梯级利用,使能源综合利用率进一步提高,可达到 $75\% \sim 90\%$ ^[3]。分布式冷热电联供系统靠近负荷中心,减小了输电线路投资,减少了输电损耗和输热

(冷)损失,在输电损失较大的地点,该系统的供电成本有可能比传统的供电方式要低。

1.2.2 机组启停灵活

分布式冷热电联供系统普遍容量小,具有操作简单、智能化、启停快速与灵活等特点,能够通过不同循环的有机整合满足用户对各种能量形式的需求,实现能量的梯级利用,也可以作为重要用户的备用电源,对大电网的削峰填谷和安全稳定有积极意义。

1.2.3 污染程度轻

分布式冷热电联供系统的环境兼容性较好,排放率低,不用在田野或其他环境敏感地区修建输配系统,可以提供清洁、无噪声的电能。使用的一次能源多为气体燃料,污染物的排放减少 $3/4$ 或更低。据计算,如果将现有建筑采用分布式冷热电联供系统的比例由 4% 提高到 8% ,到 2020 年, CO_2 排放量将减少 30% ; NO_x 排放值为 $21 \sim 35 \text{ mg}/\text{m}^3$,大大低于锅炉直接供热或其他动力系统 ($280 \sim 1\,400 \text{ mg}/\text{m}^3$); SO_2 的排放量几乎为零。另外,冷热电联供系统应用溴化锂或氨水吸收式制冷技术,不会对臭氧层造成破坏^[4]。

1.2.4 厂用电率低

分布式冷热电联供系统采用烟气作为工质,整个系统不需要大量的软化水以及循环冷却水,因此分布式冷热电联供系统的厂用电率低于 2% ;而我国火电厂的厂用电率平均为 7% 左右^[5]。

1.2.5 节省投资

分布式冷热电联供系统靠近用户,可广泛用于城区商业中心、工业园区、新开发的城区和房地产小区等,不需要建设远距离高电压或超高电压输电的大电网,可大大减少网损,节省电网建设投资和运行费用。同时节省了城市热力管网,减少市政投资以及长距离热力管网带来的热量损失。

1.2.6 系统可靠性低

分布式冷热电联供系统容量小、负荷波动大、系统容量不能互为备用,所以可靠性较低。高质量的分布式冷热电联供系统单机仅有 95% 的可靠性,而一般电网供电的可靠性较高,为 99.866% ^[6]。

1.2.7 与大电网相互补充

分布式冷热电联供系统与大电网的相互补充关系,不仅体现在独立分布式冷热电联供系统的利用方面,而且分布式冷热电联供系统与低压配电网连接为用户供电在技术上也是可行的。但是分布式冷热电联供系统接入大电网,由于频率、相位等问题,需要增加部分自控设备的投入,引起投资增加。如果考虑分布式供能系统接入特定地点

(如输电容量不足的地点)后,所带来的削峰及余热利用等收益,使得分布式冷热电联供系统与电网的连接在合适条件下同样可以为用户提供低成本电能。

2 生物质气化冷热电联供系统

2.1 生物质气化系统

生物质气化是生物质热化学转换的一种技术,在一定的热力学条件下,将组成生物质的碳氢化合物转化为含 CO 、 H_2 等可燃气体^[7]。基本原理是生物质原料首先被送入气化炉内,同时向炉内通入一定量的气化剂,部分原料与气化剂燃烧,提供热分解所需的热量。大部分原料在缺氧状态下发生热分解

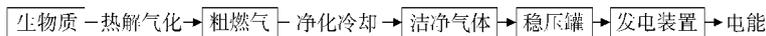


图2 生物质气电装置的工艺流程图

Fig.2 Sketch of biomass gasification system

2.2 生物质气化冷热电联供系统

生物质气化冷热电联供系统以生物质为燃料,主要由生物质气化及净化系统、发电机组、热交换器、溴化锂冷温水机组、二次余热回收装置等组成,如图3所示。生物质经过气化及净化装置后,生物质燃气的温度可达 500°C 以上,经过热交换器使其温度降低,利用内燃机、微型燃气轮机、斯特林机等设备来发电。发电后的排气温度在 200°C 以上,最高可达 500°C ^[8~9],该温度下,热交换器得到的热量可以驱动溴化锂吸收式冷温水机组,进行制冷或供热。最后的余热排气可进行二次余热利用,提供生活热水等,其热能利用如表1所示。

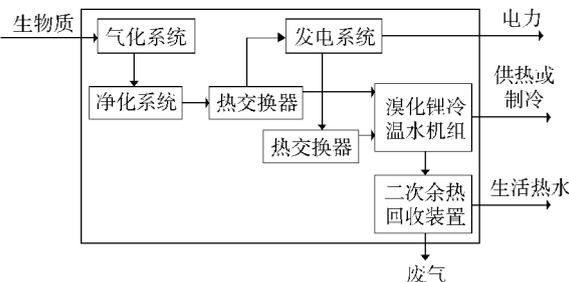


图3 生物质气化冷热电联供系统示意图

Fig.3 Sketch of CCHP based on biomass gasification

表1 生物质气化冷热电联供系统热能利用

Tab.1 Heat energy utilization of CCHP based on biomass gasification

| 生物质能利用温度/ $^\circ\text{C}$ | 热能利用设备 | 用途 |
|----------------------------|----------|-------|
| 大于 800 | 发电机组 | 供电 |
| 400 左右 | 溴化锂冷温水机组 | 供热或制冷 |
| 小于 200 | 二次余热吸收装置 | 生活热水 |

反应,析出挥发分和焦炭。挥发分在高温反应区内发生二次反应,使大分子的碳氢化合物进一步裂解为小分子的气体,同时气体和焦炭之间以及气体和气体之间进一步发生还原反应,转变为更多的可燃气体,最终得到以 CO 、 H_2 、 CH_4 为主的可燃性气体。此时得到的生物质燃气经过净化、冷却之后即可被使用,如供气、发电、做合成燃料等。

生物质燃气作为燃料用于供气或发电近年来有了较快发展。生物质原料经气化后产生的燃气可通过铺设的管网输送到各家各户,以供居民用于炊事使用或其他用途。生物质燃气也可以驱动内燃机或燃气轮机高速旋转带动发电装置发电。生物质气电装置的工艺流程如图2所示。

2.3 生物质气化冷热电联供系统的几种形式

2.3.1 以内燃机为核心

内燃机将燃料与空气注入气缸压缩,燃烧做功,推动活塞运行,通过连杆和曲轴,驱动发电机发电。投资小,启动快,变负荷性能好,余热可以回收利用,是目前世界上应用最广的发电机组,具有良好的低负荷运转性,最低可在 25% 的负荷下工作,利用柴油的机组发电效率可达到 40%,利用生物质气的机组发电效率目前为 28% 左右。燃烧做功后的排烟温度超过 500°C ,可以用来供暖(制冷)、生产热水等,实现(冷)热电联供^[10~11]。

不同气化炉、不同气化方式产生的气体成分和热值也不相同,生物质燃气热值比较低,一般在 $5 \sim 15 \text{ MJ}/\text{m}^3$,且焦油及杂质质量浓度如低于 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$,就可以供内燃机发电机组使用。另外,为避免出现爆燃问题,安全起见,一般生物质燃气内燃机要求燃气中 H_2 质量分数小于 15%。目前,160 kW 和 200 kW 的生物质燃气内燃机发电机组在我国已得到小规模应用,更大的机组还没有定型产品,正在开发之中^[10,12~13]。如 1998 年 10 月中科院广州能源所完成了 1 MW 的生物质循环流化床气化-内燃机发电系统(GIEC),5 台 200 kW 内燃式发电机组并联运行,但受气化效率与内燃机效率的限制,单位电量的生物质消耗量一般大于 $1.12 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,2000 年 7 月通过中国科学院鉴定^[13]。2005 年 4 月山东省科学院能源研究所采用胜利油田动力机械有限公司研制的 180GF-RFm 型秸秆气内燃式发电机组,以新一代二步法生物质气化技术为基础,完成 200 kW 生物质气化发电示范工程的建设,并于 2008 年 4 月通

过鉴定,所产生物质燃气热值 5 MJ/m^3 左右,通过计算得到发电机组效率约 30%,单位电量的燃气消耗量为 $2.3 \sim 2.8 \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[8]。辽宁省能源研究所于 2006 年 6 月建成以木屑或稻壳为原料的流化床生物质气化发电系统,发电量 160 kW ^[13]。

2.3.2 以斯特林机为核心

斯特林机又称热气机,利用 H_2 、 N_2 、 He 或空气为工质,按斯特林循环工作,燃料在燃烧室燃烧通过加热器传给工质,工质不直接参与燃烧。可以利用固体、液体和气体形态的燃料,燃料在外缸内接近大气压力下燃烧,对燃料的品质要求不高,燃烧温度大于 450°C 的任何种类的燃料都可以作为发动机的能源,如气化或固态的农作物秸秆及沼气,实际效率可达 32% ~ 40%。优点是排气污染小,噪音低,噪音比燃气内燃机低 15 ~ 20 dB,并且能在负荷超载 50% 的情况下运行,工作可靠,维护费用低。缺点是用于生物质气化发电的斯特林机对材料要求很高,密闭性不好控制,还需要解决高温空气供热设备的材料和工艺问题,为了能够实际应用,设备的可靠性有待提高,造价也有待降低^[14~16]。

目前,仅有少数发达国家进行了相关研究。例如比利时和奥地利为了发展适合于中小规模生物质气化发电技术,分别研制了容量为 2.5 MW 和 6 MW 的生物质气化与斯特林机发电技术结合的装置,采用该装置生物质气化后不需进行除尘除焦就可以直接在外燃机的燃烧器中燃烧,燃烧后产生的烟气用来加热空气,所产生的高温高压空气可以推动涡轮机组发电^[13]。

2.3.3 以微型燃气轮机为核心

微型燃气轮机是单机功率为 25 ~ 300 kW 的小功率燃气轮机,具有质量轻、污染小、噪音低、寿命长、运行成本低等优点,适用于天然气、生物质气化气等多种燃料。微燃机的排烟温度多在 200°C 以上,当烟气在 $200 \sim 400^\circ\text{C}$ 时可与单效溴化锂冷温水机组结合,烟气温度达 400°C 以上可与双效溴化锂冷温水机组结合。现有的带回热、变频、高速电机等设施的微型燃气轮机机组发电效率可达 25% ~ 29% 左右^[10,17]。在电网无法到达的偏僻农村和山区,将生物质气化和微型燃气轮机相结合构成简单、可靠、易维护、高效率、低污染的新型分散式发电系统,可满足偏僻农村和山区能源供应。

微型燃气轮机要求燃气最低热值要大于 $4 \sim 6 \text{ MJ/m}^3$,其中 H_2 的最低质量分数要大于 10% ~ 20%,但对焦油的要求不严,这是因为假设燃气轮机进口温度在 $450 \sim 600^\circ\text{C}$,此时焦油大部分以气态存在,但是,如果考虑到燃气需降温后再加压,则焦油

含量必须在大约 $5 \times 10^{-5} \text{ mg/kg}$ 以下^[10]。总的来说,一般生物质气化净化过程很难满足燃气轮机的要求,必须针对具体原料的特性进行专门的设计,而燃气轮机也必须经过专门的改造,以适应生物质气化发电系统的特殊要求。目前,国内外仍然没有适用于生物质气化发电系统的通用技术和设备,仅有少数几家公司进行了先进微型燃气轮机的开发与研制,比如,美国的 Honeywell 公司、英国的 Bowman 公司、Volvo 公司以及日本的川崎公司等。极少数的几个示范工程都是由专门的研究部门或厂家根据项目的要求进行改造和订造的,造价非常高,所以燃气轮机技术是制约生物质气化发电技术大型化发展的主要因素之一^[10,18~19]。

2.3.4 以燃料电池为核心

燃料电池是一种将燃料的化学能直接转化为电能的装置,不受卡诺循环限制,能量转换效率可达 40% ~ 60%,污染小,几乎不排放氮氧化物和硫化物,噪声低^[20]。以燃料电池为核心的能源系统主要是把生物质转化为富氢燃料气,包括生物质催化气化制氢、生物质热裂解制氢和生物质超临界转换制氢,并与高温的燃料电池系统相结合。生物质气化燃料电池一体化发电装置主要包括生物质预处理系统、生物质气化系统、燃气净化和重整系统、燃料电池本体等。将生物质气化和燃料电池构成一体化发电系统,具有高效率、超低排放的优点,机组发电效率达 50% ~ 60%,组成燃气-蒸汽循环发电效率可达 70% ~ 80%,热电联产时综合效率可达 80% 以上^[20~21]。不同类型的燃料电池要求不同的可燃气体组分,必须肯定的一点是 H_2 的含量越高燃料电池的发电效率就越高。另一方面,焦油对所有的燃料电池都是有害的,它的存在会严重影响电池的使用寿命,进入燃料电池的燃气要尽可能的洁净,所以降低燃气中焦油是生物质气化用于燃料电池的关键技术之一。

截至目前,所有的燃料电池均没有达到大规模民用商业化程度。为此,美国、日本及欧洲国家相继斥巨资进行开发研究^[22]。我国也在加快燃料电池的研究进程。大连化学物理研究所、长春应用化学研究所、上海交通大学、中国科学院广州能源研究所、山东省科学院能源研究所等开展了生物质气化燃料电池一体化发电技术的理论基础及工程开发研究,在关键技术上已经有所突破。其中,上海交通大学完成了 1 kW 熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)的发电试验,“十五”期间,进行了 50 kW MCFC 的研究和开发,取得了较大的进展。目前我国已经具备了研制数十千瓦级 MCFC 发电系统的能力^[10,20]。

2.4 生物质气化冷热电联供系统的特点

生物质能的梯级利用如图4所示,生物质能气化后首先用来发电,约占生物质燃气能量的15%~30%;然后用于供热或制冷,约占生物质燃气的30%~40%;再进行二次余热利用,约占生物质燃气能量的10%~20%;最后几乎不能利用的热能作为废气排放,约占生物质燃气能量的20%左右。经过气化的生物质能量利用占生物质燃气的80%左右,一般生物质气化效率在75%左右,所以经过冷热电联供的生物质能的总利用率可达到60%。

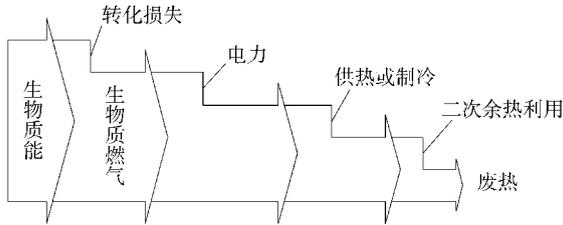


图4 生物质能梯级利用示意图

Fig.4 Sketch of cascade utilization of biomass energy

生物质气化后进行的冷热电联供是一种先进的总能系统,可以实现能量的梯级利用,能源利用效率高,具有良好的社会和经济效益。生物质气化冷热电联供系统是分布式能源中合理利用生物质能的重要技术,是高效综合利用生物质资源的重要途径之一。

3 发展生物质气化冷热电联供系统的优势与面临的问题

3.1 优势

3.1.1 资源优势

我国生物质能源丰富,据统计,2004年我国可利用生物质能中仅农作物秸秆可获得量约3.8亿t,林木废弃物可获得量约7.3亿t,两者合计折合标准煤约6.07亿t^[23]。在生物质能丰富的地区建立生物质气化冷热电联供系统,就近利用,实现能的梯级利用,不但可以缓解能源电力的不足问题,同时也避免了生物质秸秆等就地燃烧带来的环境污染,还可增加当地农民的收入。

3.1.2 技术优势

近年来,国内多家科研院所及高校在生物质能应用领域进行了研究,广州能源研究所、山东省能源研究所、辽宁省能源研究所等相继开发了生物质秸秆气化发电技术。其中,山东省能源研究所研发了新一代两步法气化技术,进行了200kW生物质气化发电示范工程的建设,并努力构建适合我国国情的分布式清洁发电模式。辽宁省能源研究所研发的“30kW固定床生物质气化发电系统”和“160kW内循环流化床生物质气化发电系统”达到了国际先进

水平^[24]。

欧洲、美国和日本在生物质能发电方面发展迅速,瑞典和丹麦利用生物质能进行热电联供,日本在生物质综合利用及发电方面制定和实施了比较详细的策略。

同时,随着内燃机、斯特林机、微型燃气轮机和燃料电池等技术的不断进步,设备费用的下降,生物质能将在热电联供和热电冷联供方面进一步发展,生物质能综合用能效率将不断提高,应用也将逐渐广泛。因地制宜建立分布式生物质气化冷热电联供系统是分布式能源的重要发展方向之一。

3.2 经济效益与社会效益

从经济上分析,小规模发电系统单位造价肯定是要高于大规模的发电系统。但实际情况是,我国幅员辽阔,在很多边远山区人口密度小,如果要对这些分散的自然村进行大电网供电建设费用将是昂贵的,同时输送过程中也会造成能源的浪费、维护费用的上升,这些因素都为在偏远地区应用大电网供电带来了困难。如果能在偏远的地区应用以生物质能为原料的分布式冷热电联供系统,建立以自然村为单位的微电网,在经济上不失为一种可行的解决方案。

应用生物质气化冷热电联供系统会带来很好的环境效益和社会效益。目前在农村生物质能应用的主要方式是燃烧,这种简单的应用方式既会带来能源的浪费也会污染环境。如果将生物质能通过能量梯级利用的方式转化为人们生活所需的能量,就可以节省大量的一次能源,同时也可以加快偏远地区用电的步伐,促进经济的快速发展。同时,由生物质能本身的特点,也会使污染物的排放降低,对环境质量的提高可起到显著的促进作用。

3.3 面临的主要问题

目前,在我国推广生物质气化冷热电联供系统还存在政策、应用、产业技术等诸多方面的问题,主要表现在以下几个方面。

3.3.1 缺乏完善的激励政策

从国外的经验看,政府的支持是发展新能源与可再生能源的关键。国际上,不论是发达国家还是发展中国家,新能源与可再生能源的发展离不开政府的支持,如激励、税收、补助、低息贷款等一系列的优惠政策,这是新能源与可再生能源产业发展的初始动力。我国可再生能源推广应用的社会效益显著,但经济效益不高,更需要国家和各级政府的激励和支持。2005年我国通过了《可再生能源法》,文中明确规定了“上网电价”和“全网平摊”的法规条款,该法的实施为改善这种状况提供了最好的历史机遇

和法规依据。

3.3.2 分布式发电并网困难

对于 MW 级以下的生物质气化冷热电联供系统,由于容量小负荷调控手段相对简单,独立运行时易受大负荷冲击等因素的影响,供电质量较低,因此最佳的运行方式应是与当地供电电网并网运行。并网问题是困扰众多小容量生物质气化冷热电联供系统的一个关键问题,供电部门从自身的管理、调度和安全角度考虑,缺乏将这些小容量发电装置接入电网的积极性,上网仍普遍面临困难。而且小型的发电装置其立项审批程序与大型电站基本同样复杂,并网接入费用较高,在一定程度上阻碍了该系统推广。

3.3.3 系统自身存在不足

主机设备(主要是燃气轮机和微燃机)国内生产能力不足,优质的小功率燃气轮机比较少。冷热电供能设备性能不稳定,系统的集成技术和经验不

足。

4 结束语

生物质气化冷热电联供系统具有多种应用形式,能够有效的满足能量梯级利用的原理,将冷、热、电加以集成,充分发挥中低温余热的作用,提高整个系统的能源利用率。同时减少了电力能源对化石燃料的依赖,尽量避免生物质能的浪费和其废弃物的污染,具有良好的环境效益和社会效益。对缓解我国能源相对紧缺,减少环境污染,合理利用农林废弃物,提供安全电力等具有重要的意义。在该系统的开发研究中,仍有许多能源政策及相关专业技术问题亟待解决。该系统的推广应用程度与国家的支持态度极为相关。因此,各级政府应该加大对能源政策的研究力度,努力为该系统在我国的发展创造一个宽松的环境,并给予优惠政策,为我国的经济发展带来新的活力。

参 考 文 献

- 李新禹,苏文. 生物质能用于热电冷三联供系统的可行性[J]. 能源工程,2005(4):14~16.
Li Xinyu, Su Wen. Discussion on feasibility of cogenerated heating electricity and refrigeration system used biomass energy [J]. Energy Engineering, 2005(4):14~16. (in Chinese)
- 孔祥强,王如竹,黄兴华. 分布式区域冷热电联供系统[J]. 大众用电,2004(7):17~19.
- 俞建洪. 论燃气轮机热电冷联产分布式电源系统[J]. 福建能源开发与节约,2003(3):10~15.
- 晏洪浩. 燃气冷热电联产系统的研究与探讨[J]. 平顶山工学院学报,2006,15(5):45~47.
Yan Honghao. Research on combined heating & cooling power production system [J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2006,15(5):45~47. (in Chinese)
- Sanjay Y, Onkar Singh, Prasad B N. Energy and exergy analysis of steam cooled reheat gas-steam combined cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5):12~32.
- 刘爱斌,翁一武,刘宏波. 一种新型分布式供能系统的研究[J]. 燃气轮机技术,2009,22(1):1~5.
Liu Aiguo, Weng Yiwu, Liu Hongbo. Study of a new kind of distributed energy system [J]. Gas Turbine Technology, 2009, 22(1):1~5. (in Chinese)
- 刘荣厚,牛卫生,张大雷. 生物质热化学转化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:109~115.
- 阳永富,申青连,段继宏,等. 生物质气化发电技术[J]. 内燃机与动力装置,2006(4):47~51.
Yang Yongfu, Shen Qinglian, Duan Jihong, et al. Biomass gasification and generation technology [J]. Internal Combustion Engine & Power Plant, 2006(4):47~51. (in Chinese)
- 王艳杰,翁一武,伊娟. 燃用超低热值燃料的燃气轮机及其热力分析[J]. 热能动力工程,2007,22(3):259~263.
Wang Yanjie, Weng Yiwu, Yi Juan. A super-low heating-value-fuel-fired gas turbine and its thermodynamic analysis [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(3):259~263. (in Chinese)
- 黄剑光. 浅谈生物质气化在发电技术应用[J]. 应用能源技术,2009(4):25~29.
Huang Jianguang. Preliminary study on power generation technology using biomass gasification [J]. Applied Energy Technology, 2009 (4):25~29. (in Chinese)
- 王志伟,雷廷宙. 生物质气化发电在分布式能源中的利用[J]. 太阳能,2007(9):35~37.
- 任永志,崔亨哲,郭军,等. 生物质气化发电机组中内燃机的运行特性分析[J]. 可再生能源,2006(6):19~22.
Ren Yongzhi, Cui Hengzhe, Guo Jun, et al. The performance and analysis of SI engine in biomass gasification for power system [J]. Renewable Energy Resources, 2006(6):19~22. (in Chinese)
- 欧训民. 生物质气化发电技术的现状及发展趋势[J]. 能源技术,2009,30(2):84~88.
Ou Xunmin. Status quo and developing trend of the biomass gasification power generation technology [J]. Energy Technology, 2009, 30(2):84~88. (in Chinese)

- 14 张全国,雷廷宙. 农业废弃物气化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:209~211.
- 15 Carlsen H, Ammundsen N, Traerup J. 40 kW stirling engine for solid fuel[C]//Energy Conversion Engineering Conference, 1996. Proceedings of the 31st Intersociety, IEEE: 1996,2:1 301~1 306.
- 16 Gaun A, Schmutzter E. Biomass-fuelled stirling micro combined heat and power plants [C] // ICCEP'07 International Conference on Clean Electrical Power, IEEE, 2007:429~432.
- 17 翁一武,苏明,翁史烈. 先进微型燃气轮机的特点与应用前景[J]. 热能动力工程,2003,18(2):111~116.
Weng Yiwu, Su Ming, Weng Shilie. Specific features of advanced micro gas turbines and their application prospects[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(2):111~116. (in Chinese)
- 18 Francisco J, Antonio C, Jose C. Biomass based micro-turbine plant and distribution network stability[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(17):2 713~2 727.
- 19 Cano A, Jurado F, Carpio J. Modelling of power plants based on gasifier/gas turbine technologies [C]. 2002 IEEE Africon—6th Africon Conference in Africa, 2002,2:797~802.
- 20 黄艳琴,阴秀丽,吴创之. 生物质气化高温燃料电池一体化发电技术[J]. 可再生能源,2006(6):43~47.
Huang Yanqin, Yin Xiuli, Wu Chuangzhi. Status of integrated biomass gasification and fuel cell power generation system [J]. Renewable Energy Resources, 2006(6):43~47. (in Chinese)
- 21 Gomez M, Jurado F. Feasibility of fuel cell systems using forest residues[R]//Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007:1~7.
- 22 Kirubakaran A, Shailendra Jain, Nema R K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(9):2 430~2 440.
- 23 中国能源年鉴编辑委员会. 中国能源年鉴 2005/2006[M]. 北京:科学出版社,2007:256.
- 24 吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报,2009,40(1):91~99.
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqi, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):91~99. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 97 页)

- 4 Liu Guisu, Tate A G, Bryant G W, et al. Mathematical modeling of coal char reactivity with CO<sub>2</sub> at high pressures and temperatures[J]. Fuel,2000,79(10):1 145~1 154.
- 5 车丽娜,王维新. 上吸式生物质气化炉的建模和模拟[J]. 农机化研究,2008(8):55~57.
- 6 Sadaka S S, Ghaly A E, Sabbah M A. Two phase biomass air-steam gasification model for fluidized bed reactors: part I—model development[J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 22(6): 436~441.
- 7 高杨,肖军,沈来宏. 串行流化床生物质气化制取富氢气体模拟研究[J]. 太阳能学报,2008,29(7):894~899.  
Gao Yang, Xiao Jun, Shen Laihong. Hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008,29(7):894~899. (in Chinese)
- 8 Carlos R Altafini, Paulo R Wander, Ronaldo M Barreto. Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(17): 2 763~2 777.
- 9 Franco C, Pinto F, Gulyurtlu I, et al. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process[J]. Fuel, 2003,82(7):835~842.
- 10 肖军,沈来宏,郑敏,等. 基于 TG-FTIR 的生物质加压热解实验研究[J]. 太阳能学报,2007,28(9):972~978.  
Xiao Jun, Shen Laihong, Zheng Min, et al. TG-FTIR analysis of pressurized pyrolysis of biomass[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007,28(9):972~978. (in Chinese)
- 11 Mathieu P, Dubuisson R. Performance analysis of a biomass gasifier[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9~12):1 291~1 294.
- 12 管国锋,赵汝溥. 化工原理[M]. 北京:化学工业出版社,2003.